

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Análise experimental de vigas em concreto armado reforçadas à flexão com concreto têxtil de fibra de vidro álcali-resistente

Cleiton Ricardo Oestreich

Porto Alegre
2022

CLEITON RICARDO OESTREICH

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE VIGAS EM CONCRETO
ARMADO REFORÇADAS À FLEXÃO COM CONCRETO
TÊXTIL DE FIBRA DE VIDRO ÁLCALI-RESISTENTE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em
Engenharia.

Porto Alegre
2022

CIP - Catalogação na Publicação

Oestreich, Cleiton Ricardo

Análise experimental de vigas em concreto armado reforçadas à flexão com concreto têxtil de fibra de vidro álcali-resistente / Cleiton Ricardo Oestreich.

-- 2022.

185 f.

Orientador: Luiz Carlos Pinto da Silva Filho.

Coorientadora: Paula Manica Lazzari.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-RS, 2022.

1. concreto têxtil. 2. argamassa reforçada com têxtil. 3. reforço à flexão. 4. abordagem experimental. I. Filho, Luiz Carlos Pinto da Silva, orient. II. Lazzari, Paula Manica, coorient. III. Título.

CLEITON RICARDO OESTREICH

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE VIGAS EM CONCRETO
ARMADO REFORÇADAS À FLEXÃO COM CONCRETO
TÊXTIL DE FIBRA DE VIDRO ÁLCALI-RESISTENTE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título
de Mestre em Engenharia.

Porto Alegre, 28 de dezembro de 2022

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
PhD. pela Universidade de Leeds, Inglaterra
Orientador

Prof.^a Paula Manica Lazzari
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande
do Sul, Brasil
Coorientadora

Prof. Lucas Festugato
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Américo Campos Filho (UFRGS)
Dr. pela Universidade de São Paulo, Brasil

Prof.^a Vanessa Fátima Pasa Dutra (UFRGS)
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Prof. Maurício Mâncio (UNISINOS)
Dr. pela University of California, Estados Unidos, Brasil

Aos meus amados pais, Teresa e Flávio.

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que, de uma forma ou de outra, estiveram ao meu lado nessa caminhada e contribuíram para a conclusão desta pesquisa.

Aos professores Luiz Carlos Pinto da Silva Filho e Paula Manica Lazzari, agradeço por terem aceitado orientar este trabalho e terem oportunizado a minha entrada na família LEME.

Aos integrantes do LEME, Edgar Lucas, José Orvandır dos Santos e Lucas Reginato pelos auxílios ao longo do programa experimental.

À empresa ArcelorMittal, agradeço a doação das armaduras empregadas na confecção das vigas.

À empresa MC-Bauchemie, agradeço a doação do aditivo superplastificante utilizado na confecção da matriz autoadensável.

Aos alunos de iniciação científica Felipe Pereira Vergara e Isadora Fochi, agradeço pelas contribuições em diferentes etapas da pesquisa.

À doutoranda Carolina Dal Agnol Dalazen, agradeço a ajuda com a análise teórica.

Aos colegas de pesquisa e futuros mestres em engenharia Sarah Lodeti Pessi, Júlia Giordani Berton e Luiz Henrique Barboza Tirado, agradeço por todo auxílio ao longo da jornada. Vocês foram fundamentais para que este trabalho se realizasse.

Aos meus amados pais Teresa Oestreich e Flávio Pedro Oestreich, agradeço por me apoiarem e ajudarem em todos os momentos. Sem vocês este dia não chegaria. Amo-os muito!

Construir é uma arte. A arte mais nobre, porém, é fazer morada nos corações, pois a vida é a verdadeira obra.

Cleiton R. Oestreich

RESUMO

OESTREICH, C. R. **Análise experimental de vigas em concreto armado reforçadas à flexão com concreto têxtil de fibra de vidro álcali-resistente**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre.

Sabe-se que o comportamento mecânico do concreto têxtil varia de acordo com as características e propriedades da matriz de cimento, do reforço têxtil e, principalmente, das ligações desenvolvidas entre eles. Quando aplicado na reabilitação de estruturas de concreto armado, a aderência entre o concreto têxtil e o substrato de concreto passa a ser mais um fator importante a ser considerado. Nesta conjuntura, o objetivo geral desta pesquisa é analisar experimentalmente o comportamento mecânico de vigas de concreto armado, quando reforçadas com concreto têxtil de fibra de vidro álcali-resistente (AR) em condições mais próximas de um reforço em campo. Com o programa experimental, busca-se investigar como as variáveis “tipo da matriz” e “revestimento do reforço” influenciam no desempenho dos elementos no ensaio de flexão a 4 pontos. Para a variável “tipo da matriz”, fez-se o reforço de 7 vigas com argamassa polimérica industrializada (M1) e 7 vigas com argamassa autoadensável (M2). Para a variável “revestimento do reforço”, trabalhou-se com 4 configurações: têxtil sem revestimento (SR), revestido com epóxi (E), totalmente revestido com epóxi e areia (EA) ou totalmente revestido com epóxi, mas com areia somente nas extremidades (EAP). Quanto às cargas máximas, verificou-se que todas as vigas reforçadas apresentaram aumentos da capacidade resistente em relação à viga testemunho. Para as vigas de M1, as cargas máximas revelaram aumentos entre 52,0% e 80,26%. Para os exemplares de M2, os resultados foram semelhantes, variando de 51,84% a 83,24%, sendo que, em ambos os casos, os maiores percentuais foram observados nos exemplares dos têxteis EAP. Acerca dos deslocamentos-limites, verificou-se que todas as vigas reforçadas apresentaram deflexões inferiores à da viga testemunho para a carga de 20 kN. Logo, verificou-se que o reforço, além de aumentar a capacidade das vigas, diminuiu as deflexões para cargas mais baixas. Em relação às deflexões na ruptura, identificou-se que todas as vigas reforçadas apresentaram deslocamentos verticais superiores ao da viga testemunho, com valores até 88,31% maiores. Logo, embora os esforços atuantes tenham superado a aderência na interface têxtil-matriz, atestou-se a eficiência da ancoragem promovida pelos tratamentos do reforço, uma vez que permitiu maior solicitação do têxtil, postergando o deslizamento. Quanto à ductilidade, verificou-se que todas as vigas reforçadas apresentaram comportamento mais dúctil que a viga testemunho, com resultados expressivos para os exemplares dos têxteis EAP, atingindo cerca de 37,10% de aumento máximo e 35,31% em média. Acerca das demais configurações, têxteis revestidos com epóxi (E) e epóxi e areia (EA) os resultados não podem ser conclusivos, uma vez que houve diferença significativa de comportamento entre as repetições. Sobre o fator de tenacidade, verificou-se que todas as vigas reforçadas apresentaram aumento da energia de ruptura em relação à viga testemunho. Para a deflexão de ruptura, verificou-se aumento médio de 136,17%, com valores entre 83,54% e 221,04%.

Palavras-chave: *concreto têxtil, argamassa reforçada com têxtil, reforço à flexão, abordagem experimental.*

ABSTRACT

OESTREICH, C. R. **Análise experimental de vigas em concreto armado reforçadas à flexão com concreto têxtil de fibra de vidro álcali-resistente.** 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre.

It is known that the mechanical behavior of textile concrete varies according to the characteristics and properties of the cement matrix, textile reinforcement and, mainly, the connections developed between them. When applied in the rehabilitation of reinforced concrete structures, the adhesion between the textile concrete and the concrete substrate becomes another important factor to be considered. In this context, the general objective of this research is to experimentally analyze the mechanical behavior of reinforced concrete beams, when reinforced with alkali-resistant fiberglass (AR) textile reinforced concrete in conditions closer to field reinforcement. With the experimental program, we seek to investigate how the variables “type of matrix” and “reinforcement coating” influence the performance of the elements in the 4-point bending test. For the variable “type of matrix”, 7 beams were reinforced with industrialized polymeric mortar (M1) and 7 beams with self-compacting mortar (M2). For the variable “reinforcement coating”, 4 configurations were used: uncoated textile (SR), coated with epoxy (E), fully coated with epoxy and sand (EA) or fully coated with epoxy, but with sand only on the sides. extremities (EAP). As for the maximum loads, it was verified that all the reinforced beams showed increases in the resistance capacity in relation to the witness beam. For the M1 beams, the maximum loads revealed increases between 52.0% and 80.26%. For the M2 specimens, the results were similar, ranging from 51.84% to 83.24%, and, in both cases, the highest percentages were observed in the specimens of EAP textiles. Regarding limit displacements, it was verified that all reinforced beams presented lower deflections than the witness beam for a load of 20 kN. Therefore, it was verified that the reinforcement, in addition to increasing the capacity of the beams, reduced the deflections for lower loads. Regarding the deflections at failure, it was identified that all reinforced beams presented vertical displacements greater than that of the witness beam, with values up to 88.31% higher. Therefore, although the active efforts have overcome the adhesion at the textile-matrix interface, the efficiency of the anchoring promoted by the reinforcement treatments was attested, since it allowed greater demand on the textile, postponing the sliding. As for ductility, it was found that all reinforced beams showed a more ductile behavior than the witness beam, with expressive results for the EAP textile specimens, reaching approximately 37.10% of maximum increase and 35.31% on average. Regarding the other configurations, textiles coated with epoxy (E) and epoxy and sand (EA), the results cannot be conclusive, since there was a significant difference in behavior between repetitions. Regarding the toughness factor, it was found that all reinforced beams showed an increase in failure energy in relation to the witness beam. For rupture deflection, there was an average increase of 136.17%, with values between 83.54% and 221.04%.

Palavras-chave: *textile reinforced concrete, textile reinforced mortar, flexural strengthening, experimental approach.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Composição do concreto têxtil.....	22
Figura 2 – Fluxograma da Etapa 1	30
Figura 3 – Fluxograma das Etapas 2 e 3.....	31
Figura 4 – Comparativo da disposição do reforço em compósitos de concreto	36
Figura 5 – Tipos de reforços têxteis	37
Figura 6 – Estrutura do fio têxtil	39
Figura 7 – Tecido do tipo simples	40
Figura 8 – Tecido do tipo leno.....	40
Figura 9 – Malhas de urdume e de trama	41
Figura 10 – Tipos de malhas de urdume.....	41
Figura 11 – Pontos do tipo pilar e do tipo tricô	42
Figura 12 – Desenho representativo e imagem de têxtil com ponto do tipo tricô.....	43
Figura 13 – Desenho representativo e imagem de têxtil com ponto do tipo pilar.....	43
Figura 14 – Desenho representativo e imagem de têxtil com ponto do tipo simples.....	44
Figura 15 – Têxtil com estrutura colada.....	45
Figura 16 – Tipos de fibras.....	46
Figura 17 – Curva característica do comportamento mecânico de concretos reforçados com fibras submetidos à tração	54
Figura 18 – Curva característica do comportamento mecânico de concretos reforçados com fibras submetidos à flexão	55
Figura 19 – Diagrama tensão-deformação do concreto têxtil sob tração uniaxial	56
Figura 20 – Representação esquemática (à esquerda) e vista ampliada (à direita) de um fio têxtil não impregnado pela matriz de cimento.....	58
Figura 21 – Vista ampliada de um fio têxtil (à esquerda), e a representação esquemática da transferência de tensões entre os filamentos de borda e de núcleo (à direita).....	58
Figura 22 – Representação da aderência de um fio têxtil impregnado.....	60
Figura 23 – Representação da transferência de esforços no fio têxtil impregnado e no não impregnado	60
Figura 24 – Curva tensão-deslizamento do fio têxtil impregnado e do não impregnado.....	61
Figura 25 – Moldagem na posição horizontal	65
Figura 26 – Moldagem na posição vertical	65

Figura 27 – Laminação	66
Figura 28 – Curva da carga em função do deslocamento de vigas em concreto armado reforçadas com concreto têxtil submetidas ao ensaio de flexão a quatro pontos	71
Figura 29 – Códigos de referência das vigas	75
Figura 30 – Configurações de revestimento para o têxtil	77
Figura 31 – Curva granulométrica acumulada da areia	83
Figura 32 – Têxtil AR-360-RA-04	84
Figura 33 – Código de referência do têxtil	85
Figura 34 – AR-360-RA-04 ampliado 79 vezes (a) e 225 vezes (b) no estereomicroscópio ...	86
Figura 35 – AR-360-RA-04 ampliado 50 vezes no microscópio eletrônico de varredura	86
Figura 36 – Preparação do têxtil para o ensaio de tração direta	87
Figura 37 – Configuração das vigas antes e depois do reforço	91
Figura 38 – Marcação das barras longitudinais	92
Figura 39 – Lixamento das barras longitudinais	92
Figura 40 – Montagem das vigas.....	93
Figura 41 – Finalização do processo de montagem.....	93
Figura 42 – Moldagem dos corpos de prova cilíndricos	94
Figura 43 – Preparação para a concretagem.....	94
Figura 44 – Acondicionamento das vigas e dos corpos de prova.....	95
Figura 45 – Delimitação da área dos apoios (sem jateamento)	96
Figura 46 – Superfície jateada das vigas	96
Figura 47 – Rugosidade promovida ao substrato	96
Figura 48 – Rolo (a) e tiras (b) de têxtil de fibra de vidro AR	97
Figura 49 – Proteção do local de instalação do extensômetro.....	98
Figura 50 – Execução do revestimento de epóxi.....	98
Figura 51 – Execução do revestimento de areia	98
Figura 52 – Detalhe do revestimento de epóxi e areia	98
Figura 53 – Tiras de têxtil sem revestimento (a), revestidas com epóxi (b), com epóxi e areia (c) e com epóxi e areia parcial (nas extremidades) (d).....	99
Figura 54 – Simbologia dos extensômetros da marca Kyowa.....	100
Figura 55 – Posicionamento do extensômetro com fita adesiva	101
Figura 56 – Fixação do extensômetro com cola de contato	101
Figura 57 – Instalação do cabo para transmissão de dados	101
Figura 58 – Isolamento entre os fios do extensômetro.....	102

Figura 59 – Aplicação de selante de poliuretano.....	102
Figura 60 – Revestimento com fita de auto fusão	102
Figura 61 – Proteção dos terminais dos cabos.....	103
Figura 62 – Fixação da haste metálica.....	103
Figura 63 – Marcação da viga para instrumentação	104
Figura 64 – Remoção da camada superficial de concreto	104
Figura 65 – Uniformização da superfície de concreto.....	104
Figura 66 – Fixação do extensômetro na superfície da viga	105
Figura 67 – Soldagem do extensômetro no cabo de aquisição de dados.....	105
Figura 68 – Revestimento da extremidade livre do cabo de dados com estanho	105
Figura 69 – Proteção do extensômetro com adesivo plástico.....	106
Figura 70 – Rompimento do fio de trama para fixação do extensômetro	106
Figura 71 – Fixação do extensômetro na superfície do têxtil.....	107
Figura 72 – Ponte de ligação entre o extensômetro e o cabo de dados	107
Figura 73 – Proteção do extensômetro com fita isolante e adesivo de silicone	107
Figura 74 – Proteção da instalação do extensômetro fixado ao têxtil	108
Figura 75 – Equipamento empregado para a produção das matrizes de reforço.....	109
Figura 76 – Chanfros nas extremidades das vigas.....	109
Figura 77 – Recorte de etileno-acetato de vinila (EVA)	110
Figura 78 – Contenção lateral da forma	110
Figura 79 – Posicionamento do têxtil no centro da sua respectiva camada	111
Figura 80 – Viga reforçada com três camadas de argamassa industrializada	111
Figura 81 – Vigas reforçadas e protegidas por lona plástica.....	112
Figura 82 – Retirada das formas	112
Figura 83 – Forma graduada fixa	113
Figura 84 – Espaçadores cerâmicos.....	113
Figura 85 – Posicionamento dos espaçadores	113
Figura 86 – Lançamento da matriz autoadensável	114
Figura 87 – Imperfeições geométricas das vigas.....	114
Figura 88 – Elementos do sistema de escoramento externo	115
Figura 89 – Escoramento externo	115
Figura 90 – Vigas reforçadas com a matriz autoadensável	115
Figura 91 – Desforma das vigas dos lotes 3 e 4	116
Figura 92 – Representação gráfica do ensaio de flexão a 4 pontos.....	116

Figura 93 – Representação real do ensaio de flexão a 4 pontos	117
Figura 94 – Viga posicionada para ensaio	117
Figura 95 – Sistema de aplicação de carga e posicionamento dos LVDTs	117
Figura 96 – Disposição dos extensômetros	118
Figura 97 – Diagrama esquemático de equilíbrio de uma viga reforçada à flexão	119
Figura 98 – Fluxograma de cálculo iterativo da capacidade resistente à flexão	123
Figura 99 – Preparação dos corpos de prova	125
Figura 100 – Ensaio de resistência à compressão do concreto	125
Figura 101 – Ensaio de módulo de elasticidade estático do concreto	126
Figura 102 – Sistema para aquisição e leitura dos dados	126
Figura 103 – Barras de aço CA-60 ensaiadas à tração	127
Figura 104 – Ensaio de resistência à tração do aço	127
Figura 105 – Ruptura da barra	128
Figura 106 – Configuração do ensaio de mini-slump	129
Figura 107 – Matrizes autoadensáveis com instabilidade	130
Figura 108 – Matrizes autoadensáveis com estabilidade	130
Figura 109 – Ensaio de resistência à compressão das argamassas de reforço	131
Figura 110 – Ensaio de módulo de elasticidade estático das argamassas	133
Figura 111 – Curva da carga em função do deslocamento no centro do vão (a) e as deformações específicas do aço e do concreto (b) da viga testemunho	136
Figura 112 – Ruptura da viga testemunho	137
Figura 113 – Cargas máximas resistidas pelas vigas	138
Figura 114 – Aumento da capacidade resistente das vigas em relação à viga testemunho	139
Figura 115 – Comparativo entre a capacidade resistente esperada e a experimental	140
Figura 116 – Curva carga deslocamento no centro do vão das vigas	141
Figura 117 – Curva carga deslocamento das vigas VT, V1 e V8	143
Figura 118 – Curva carga deslocamento das vigas VT, V2, V3, V9, V10	143
Figura 119 – Curva carga deslocamento das vigas VT, V4, V5, V11 e V12	144
Figura 120 – Curva carga deslocamento das vigas VT, V6, V7, V13 e V14	145
Figura 121 – Aumento percentual da capacidade resistente das vigas reforçadas quanto aos deslocamentos-limites em comparação aos da viga testemunho	146
Figura 122 – Comparativo entre os valores de deflexão das vigas para as cargas de 20 kN, 30 kN e de ruptura (carga máxima)	147

Figura 123 – Comparativo entre os valores de deformação específica do aço para as cargas de 20 kN, 30 kN e de ruptura (carga máxima)	148
Figura 124 – Comparativo entre os valores de deformação específica do concreto para as cargas de 20 kN, 30 kN e de ruptura (carga máxima)	149
Figura 125 – Deformações específicas do aço e do concreto nas vigas de M1.....	149
Figura 126 – Deformações específicas do aço e do concreto nas vigas de M2.....	150
Figura 127 – Formação de fissuras (a) e de abertura da fissura central (b).....	150
Figura 128 – Ruptura por falha na ancoragem do têxtil no interior da matriz nas vigas V1 (a) e V2 (b).....	151
Figura 129 – Ruptura das fibras na viga V14.....	151
Figura 130 – Ruptura por falta de ancoragem do reforço na viga V13	151
Figura 131 – Deformações específicas do têxtil.....	152
Figura 132 – Deformações específicas do têxtil das vigas V1 e V8	153
Figura 133 – Deformações específicas do têxtil das vigas V1, V2, V3, V8, V9 e V10.....	154
Figura 134 – Deformações específicas do têxtil das vigas V1, V4, V5, V8, V11 e V12.....	155
Figura 135 – Deformações específicas do têxtil das vigas V1, V6, V7, V8, V13 e V14.....	155
Figura 136 – Fatores de ductilidade das vigas do programa experimental	157
Figura 137 – Variação de ductilidade das vigas reforçadas em relação à viga testemunho...	158
Figura 138 – Critério da JSCE-SF4 para o cálculo da tenacidade	159
Figura 139 – Área sob a curva da força até o deslocamento de $l/150$ da viga V14	160
Figura 140 – Valores de tenacidade à flexão.....	161
Figura 141 – Variação de tenacidade das vigas reforçadas em relação à VT	162

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Influência do tipo de ponto de costura em propriedades do concreto têxtil	44
Tabela 2 – Propriedades de alguns tipos de fibras.....	46
Tabela 3 – Propriedades de alguns tipos de fibras de vidro	50
Tabela 4 – Composições de matrizes para concreto têxtil.....	52
Tabela 5 – Propriedades básicas de matrizes de concreto têxtil endurecidas.....	53
Tabela 6 – Variáveis da pesquisa	75
Tabela 7 – Parâmetros da pesquisa.....	78
Tabela 8 – Dados técnicos da argamassa Nafufill CR.....	80
Tabela 9 – Traço da matriz autoadensável	82
Tabela 10 – Composição CPV ARI da Companhia Nacional de Cimentos.....	82
Tabela 11 – Características físicas e químicas da sílica ativa	82
Tabela 12 – Análise granulométrica da areia	83
Tabela 13 – Dados técnicos do aditivo MC-PowerFlow 4000.....	84
Tabela 14 – Dados técnicos do têxtil AR-360-RA-04.....	85
Tabela 15 – Cargas de ruptura do têxtil AR-360-RA-04.....	87
Tabela 16 – Dados técnicos da resina epóxi Sikadur®-32.....	88
Tabela 17 – Dados técnicos do aditivo ADVA® 518	90
Tabela 18 – Dados da concretagem.....	93
Tabela 19 – Massa das tiras após a aplicação do revestimento.....	99
Tabela 20 – Idade das vigas e dos reforços na data do ensaio de flexão.....	118
Tabela 21 – Resistência à compressão do concreto.....	125
Tabela 22 – Módulo de elasticidade do concreto	127
Tabela 23 – Tensão de escoamento e tensão de ruptura do aço	128
Tabela 24 – Classes do índice de estabilidade visual	129
Tabela 25 – Medidas do índice de espalhamento	130
Tabela 26 – Resistência à compressão da matriz 1 (argamassa industrializada).....	131
Tabela 27 – Resistência à compressão da matriz 2 (argamassa autoadensável)	132
Tabela 28 – Resistência à compressão dos corpos de prova de controle	132
Tabela 29 – Módulo de elasticidade da matriz 1 (argamassa industrializada)	133
Tabela 30 – Módulo de elasticidade da matriz 2 (argamassa autoadensável).....	133
Tabela 31 – Dados da geometria das vigas.....	134

Tabela 32 – Parâmetros do concreto.....	134
Tabela 33 – Parâmetros do aço.....	135
Tabela 34 – Parâmetros do concreto têxtil	135
Tabela 35 – Comparativo entre as cargas de ruptura da viga testemunho	137
Tabela 36 – Aumento teórico estimado da capacidade resistente das vigas reforçadas.....	139
Tabela 37 – Comparativo de desempenho das vigas em relação aos diferentes tipos de revestimento do têxtil	142
Tabela 38 – Valores de força no estado limite de serviço (deflexões de $l/250$ e $l/350$).....	146
Tabela 39 – Comparativo entre os fatores de ductilidade das vigas.....	157
Tabela 40 – Valores de tenacidade à flexão e fatores de tenacidade.....	161

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	21
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	25
1.1.1 Considerações sobre a pesquisa de Giese (2019)	26
1.1.2 Considerações sobre a pesquisa de Dalazen (2021)	27
1.2 DELINEAMENTO DA PESQUISA.....	28
1.3 OBJETIVOS	32
1.3.1 Objetivo geral	32
1.3.2 Objetivos específicos	32
1.4 LIMITAÇÕES	33
1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	34
2. CONCRETO TÊXTIL	35
2.1 REFORÇO TÊXTIL.....	37
2.1.1 Geometria dos têxteis	39
2.1.1.1 Tecidos	39
2.1.1.2 Malhas	40
2.1.1.3 Não tecidos	44
2.1.2 Tipos de fibras	45
2.1.2.1 Fibras de aramida.....	47
2.1.2.2 Fibras de basalto	48
2.1.2.3 Fibras de carbono	48
2.1.2.4 Fibras de vidro álcali-resistente.....	49
2.2 MATRIZ CIMENTÍCIA	51
2.3 COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO TÊXTIL	53
2.3.1 Interfaces filamento-filamento e têxtil-matriz.....	57
2.3.2 Tratamento do têxtil por impregnação	59
2.3.3 Tratamento do têxtil por revestimento	62

2.3.4 Métodos de produção do concreto têxtil.....	64
2.3.4.1 Moldagem.....	64
2.3.4.2 Laminação	66
2.3.4.3 Pulverização.....	66
2.4 CONCRETO TÊXTIL PARA O REFORÇO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO	67
2.4.1 Pesquisas e aplicações para o reforço de vigas.....	68
2.4.2 Interface matriz-substrato	71
2.4.3 Tratamento do substrato	73
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	74
3.1 VARIÁVEIS DA PESQUISA.....	72
3.1.1 Tipo da matriz.....	76
3.1.2 Revestimento do reforço.....	77
3.2 PARÂMETROS DA PESQUISA	78
3.3 DESCRIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	79
3.3.1 Materiais utilizados para a produção do concreto têxtil.....	79
3.3.1.1 Matriz 1: argamassa industrializada	79
3.3.1.2 Matriz 2: argamassa autoadensável	81
3.3.1.3 Têxtil.....	84
3.3.1.4 Adesivo epoxídico	87
3.3.1.5 Areia (revestimento do têxtil).....	88
3.3.2 Materiais utilizados para a produção das vigas de concreto armado.....	88
3.3.2.1 Aço	89
3.3.2.2 Cimento	89
3.3.2.3 Aditivo superplastificante.....	89
3.4 CONCRETAGEM DAS VIGAS.....	90
3.4.1 Geometria das vigas	90
3.4.2 Preparação e montagem das armaduras.....	91
3.4.3 Traço do concreto	93
3.4.4 Armazenamento.....	95

3.5 PREPARAÇÃO DO SUBSTRATO.....	95
3.6 PREPARAÇÃO DO TÊXTIL.....	97
3.7 INSTRUMENTAÇÃO.....	99
3.7.1 Instrumentação do aço.....	100
3.7.2 Instrumentação do concreto.....	103
3.7.3 Instrumentação do têxtil.....	106
3.8 EXECUÇÃO DOS REFORÇOS.....	108
3.8.1 Reforço dos lotes 1 e 2.....	108
3.8.2 Reforço dos lotes 3 e 4.....	112
3.9 ENSAIO DE FLEXÃO A 4 PONTOS.....	116
3.10 ANÁLISE TEÓRICA.....	119
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	124
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	124
4.1.1 Resistência à compressão do concreto.....	124
4.1.2 Módulo de elasticidade estático do concreto.....	126
4.1.3 Resistência à tração do aço.....	127
4.1.4 Classificação da matriz autoadensável no estado fresco.....	128
4.1.5 Resistência à compressão das argamassas de reforço.....	131
4.1.6 Módulo de elasticidade estático das argamassas de reforço.....	133
4.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	134
4.2.1 Carga de ruptura teórica.....	134
4.2.2 Viga testemunho.....	136
4.2.3 Análise de resultados dos ensaios de flexão.....	137
4.2.3.1 Carga máxima.....	138
4.2.3.2 Comportamento à flexão.....	140
4.2.3.3 Influência do tipo de matriz e do revestimento no reforço têxtil.....	142
4.2.3.4 Deslocamento-limite.....	145
4.2.3.5 Modo de ruptura.....	148
4.2.3.6 Deformação específica do têxtil.....	152

4.2.3.7 Fator ductilidade.....	156
4.2.3.8 Fator tenacidade.....	159
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	163
5.1 CONCLUSÕES.....	163
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	166
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	167
APÊNDICE A - SÍNTESE DE RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FLEXÃO	175
APÊNDICE B - PLANILHA DE VERIFICAÇÃO (ANÁLISE TEÓRICA).....	183
APÊNDICE C - ANÁLISE NUMÉRICA E MODELAGEM COMPUTACIONAL	184

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento contínuo da ciência dos materiais, das tecnologias de produção e dos métodos construtivos, aliado às diretrizes econômicas, sociais e de sustentabilidade ambiental, é um desafio para todas as nações. A construção de estruturas cada vez maiores, leves e esbeltas tem exigido materiais com propriedades elevadas em termos de desempenho, resistência e durabilidade. Simultaneamente, a demanda por grandes investimentos em manutenção e reabilitação de estruturas existentes tornam esse contexto ainda mais desafiador.

Sob este prisma, o conhecimento científico, embora pareça estar direcionado somente à construção de novas estruturas, também é essencial para o desenvolvimento sustentável da construção civil. A reabilitação e a extensão da vida útil de estruturas deterioradas contribuem para a preservação dos recursos naturais finitos, como materiais e energia, e tornam-se opções viáveis frente à demolição e à construção de estruturas de reposição.

No Brasil, a durabilidade das estruturas de concreto armado se destaca como uma necessidade crescente, principalmente após as revisões das NBR 15575: Edificações habitacionais - Desempenho (ABNT, 2013) e NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento (ABNT, 2014). As atualizações normativas ressaltam a importância dos parâmetros de projeto e a gestão dos fenômenos de deterioração que podem afetar as estruturas de concreto armado ao longo da sua vida útil (GIESE, 2019).

Entre as novas soluções técnicas, destaca-se o uso dos materiais compósitos reforçados com fibras, em particular, do concreto têxtil (*Textile Reinforced Concrete*, TRC), um compósito resultante da união entre uma matriz cimentícia de granulometria fina e uma ou mais camadas de reticulados de fibras não metálicas de altas propriedades mecânicas (GRIES et al., 2006). Os materiais mais utilizados na produção do concreto têxtil são as malhas de fibra de vidro álcali-resistente (AR), carbono, aramida e basalto. A composição do concreto têxtil é apresentada na Figura 1.



Figura 1 – Composição do concreto têxtil (Fonte: Adaptado de AJDUKIEWICZ et al., 2012)

Devido ao seu grande potencial técnico e econômico, o concreto têxtil tem sido extensivamente estudado na Alemanha, nos centros de pesquisa das Universidades de Aachen e Dresden, desde o final da década de 90. Concomitantemente, diversos países, como Estados Unidos, Inglaterra, Japão, Brasil e Israel, também desenvolvem pesquisas com o material, apresentando contribuições importantes para esta área do conhecimento (MOBASHER, 2012; SCHEERER, 2015). As pesquisas visam a caracterização do compósito a partir de investigações teóricas e experimentais, o desenvolvimento de tecnologias de produção automatizada e novos campos de aplicação para o material (BRUCKERMANN, 2007; HEGGER et al., 2006).

De acordo com Lieboldt et al. (2008), Mechtcherine (2013) e Kulas (2015), o concreto têxtil apresenta propriedades mecânicas e durabilidade semelhantes ou, em muitos casos, superiores às do concreto armado. Com alta resistência aos esforços de tração e compressão, o compósito se destaca pela ausência de elementos metálicos, o que o torna resistente à corrosão e altamente apropriado para aplicações em estruturas esbeltas e leves e/ou para reforço de estruturas. Em comparação ao compósito cimentício de fibras curtas, em que as fibras são distribuídas aleatoriamente na matriz, no concreto têxtil, os reticulados são dispostos na direção da tensão solicitante principal, o que leva a uma alta eficácia do material em termos de desempenho mecânico (BROCKMANN, 2005; BRUCKERMANN, 2007).

Quando aplicado como reforço em estruturas de concreto armado, destaca-se que a presença da matriz cimentícia facilita a aderência do reforço ao substrato e torna a estrutura reparada mais homogênea. Com o reticulado têxtil imerso na matriz, o compósito também apresenta maior resistência a temperaturas elevadas, podendo ser aplicado em superfícies úmidas ou em baixas temperaturas (DONNINI et al., 2017; RAOOF et al., 2017; OMBRES, 2011).

Do ponto de vista ambiental, a possibilidade de criar estruturas de menor espessura resulta na diminuição do consumo de cimento Portland e em menores níveis de emissão de dióxido de carbono. Assim, além da redução de custo com a manutenção de elementos oxidados, estima-se que a utilização do concreto têxtil possa diminuir em até 80% o consumo de concreto (KULAS, 2015).

Sob essa perspectiva, a partir de análises qualitativas e quantitativas, Portal et al. (2015) avaliaram o potencial ambientalmente sustentável do concreto têxtil com diferentes tipos de fibra (de basalto, de carbono e de vidro álcali-resistente) em comparação ao concreto armado tradicional. Variáveis como durabilidade, ciclo de vida do material (extração, produção, uso, manutenção, demolição, descarte, reutilização e reciclagem), demanda energética, emissão e produção de resíduos foram consideradas. Quando comparado ao concreto armado convencional, verificou-se que o concreto têxtil diminui consideravelmente a demanda por energia e o impacto ambiental. Observou-se, também, que o concreto reforçado com fibras de basalto apresentou a menor demanda cumulativa de energia, enquanto o concreto reforçado com fibra de carbono gerou o menor impacto ambiental. Logo, tais características tornam o concreto têxtil um material de construção sustentável.

Arquitetura e design são outros campos de aplicação do concreto têxtil. A flexibilidade do material, aliada às propriedades mecânicas elevadas, permite a criação de formas livres, artísticas e funcionais. De acordo com Peled e Mobasher (2005), Krüger e Reinhardt (2006) e Bahr (2016), as aplicações incluem a fabricação de elementos de proteção, painéis de fachada, revestimento de túneis, elementos do tipo sanduíche, estruturas curvas, pontes, obras de arte e mobiliário.

Além das aplicações mencionadas com carregamento predominantemente estático, o concreto têxtil também se mostrou útil para aumentar a resistência estrutural sob carregamento dinâmico. Para o caso de carregamento sísmico, pilares convencionais de concreto armado reforçados com concreto têxtil foram testados com sucesso por Bournas et al. (2007). Neste sentido, Hartig (2011) esclarece que o concreto têxtil não se destina a substituir o concreto armado em seus principais campos de aplicação, mas ser uma solução construtiva alternativa.

Quanto à nomenclatura “concreto têxtil”, Denardi (2016) discorre que, por ser um material relativamente novo e não normatizado, existem diferentes termos na literatura para se referir ao compósito. Pesquisas alemãs, por exemplo, concentram-se no termo “*Textile Reinforced*

Concrete, (TRC)”, traduzido no Brasil como “concreto têxtil, (CT)”. Giese (2019) esclarece que o termo “concreto têxtil” é mais empregado nas pesquisas que estudam o material como solução alternativa para o concreto armado, substituindo o uso da armadura de aço pelo reticulado têxtil. Os trabalhos que estudam a aplicação do compósito como reforço e reparo, geralmente, adotam uma nomenclatura diferente para a técnica, como “argamassa reforçada com têxtil, (ART)” ou “matriz cimentícia reforçada com têxtil, (MCRT)”, ou “*Textile Reinforced Mortar, (TRM)*” e “*Fiber Reinforced Cimentitious Matrix, (FRCM)*” na língua inglesa.

Nessa perspectiva, sabe-se que o concreto tradicional é constituído por cimento, agregado miúdo, agregado graúdo, água e adições. Na ausência de agregado graúdo, tem-se a argamassa, uma mistura homogênea de baixa capacidade estrutural, empregada, geralmente, em assentamentos, preenchimentos e revestimentos. A divergência de nomenclatura surge, então, do fato de não haver agregado graúdo na composição da matriz do concreto têxtil, embora, devido as suas excelentes propriedades mecânicas, proporcionadas pelas fases matriz e reforço, torna-se possível caracterizá-lo como concreto (BRAMESHUBER et al., 2006).

Denardi (2016) salienta que a escolha do nome "concreto têxtil" pode ter sido, também, estratégica, com o objetivo de ressaltar o potencial do material, torná-lo viável e rentável, ao passo que aumenta a sua procura e utilização. De acordo com Mechtcherine et al. (2016), a tendência é que têxteis com maior abertura de malha sejam mais frequentes, permitindo agregados de maiores diâmetros, aproximando a matriz de concreto têxtil à do concreto armado tradicional. Por estes motivos, alinhado à nomenclatura alemã, será adotado o termo “concreto têxtil” para se referir ao compósito.

No Brasil, as pesquisas com concreto têxtil ainda são recentes, com alguns estudos sendo realizados na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), na Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos) e na Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Na UFRGS, destacam-se os trabalhos de diplomação de Denardi (2016), Morassutti (2016) e Nora (2018), as dissertações de mestrado de Araújo (2019), Giese (2019) e Dalazen (2021), e a tese de doutorado de Reginato (2020). Na UFRJ, destaca-se a tese de doutorado de Rambo (2016), e, na Unisinos, as pesquisas de mestrado de Grings (2020), Brescovit (2021) e de doutorado de Ortolan (2021).

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA

O concreto têxtil abre novas possibilidades para a construção civil. Porém, opostamente à produção do aço, inexistem ainda um órgão ou norma regulamentadora que uniformize os processos de fabricação e de aplicação, o que provoca diferenças quanto às características dos materiais e, conseqüentemente, grande variabilidade de resultados entre as pesquisas.

Por não ser uma realidade no cenário brasileiro, o número de pesquisas sobre o concreto têxtil ainda é pequeno, dificultando o seu emprego. Por conseguinte, muito trabalho deve ser feito para que esse material, relativamente novo, seja amplamente conhecido, aceito e usado como material de construção. Uma base sólida de conhecimentos e especificações técnicas são necessárias para a elaboração de normas e diretrizes, antes do concreto têxtil ser introduzido na prática da construção civil.

Segundo Rambo (2016), o comportamento mecânico do concreto têxtil varia de acordo com as características e propriedades da matriz (resistência, módulo de elasticidade, reologia), do reforço têxtil (tipo de fibra, arranjo espacial, volume de fibras, presença de revestimento) e, principalmente, das ligações desenvolvidas entre eles. Quando aplicado na reabilitação de estruturas de concreto armado, a aderência entre o concreto têxtil e o substrato de concreto passa a ser mais um fator importante a ser considerado.

Assim, quanto ao uso do concreto têxtil como reforço de estruturas de concreto armado, há a necessidade de aderência em, pelo menos, três interfaces: filamento-filamento, têxtil-matriz e matriz-substrato. A primeira refere-se à aderência entre os multifilamentos de fibras que compõem os fios do reticulado têxtil; a segunda refere-se à aderência entre a matriz cimentícia e o têxtil; e a terceira trata da aderência entre o concreto têxtil e a estrutura a ser reforçada. Tais ligações podem ser consideradas como regiões de fragilidade, devido à heterogeneidade dos materiais.

A perda de aderência é um efeito que pode trazer conseqüências graves para uma estrutura. Esse problema ocorre, principalmente, quando a interface de contato entre dois materiais não é devidamente preparada e/ou executada. Assim, ao se reforçar uma estrutura com concreto têxtil, é fundamental que todas as interfaces sejam tratadas adequadamente para que as descontinuidades construtivas não se traduzam em descontinuidades estruturais. Por ser um

material relativamente recente, o uso do concreto têxtil para reforço de estruturas necessita de estudos teóricos e experimentais sobre os materiais e as técnicas utilizadas.

Diante disso, a proposta deste estudo busca dar continuidade aos trabalhos de Giese (2019) e Dalazen (2021) sobre estruturas de concreto armado reforçadas com concreto têxtil, desenvolvidos no Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais (LEME) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

1.1.1 Considerações sobre a pesquisa de Giese (2019)

O objetivo do trabalho de Giese (2019) foi avaliar o reticulado têxtil de fibra de vidro alcali-resistente de produção nacional quanto ao seu desempenho ao ser empregado como reforço estrutural em vigas de concreto armado submetidas ao ensaio de flexão a 4 pontos. De caráter exploratório, o programa experimental foi composto por 9 configurações de vigas com 2 repetições cada, totalizando 18 vigas, e avaliou 3 variáveis: o número de camadas de têxtil (2, 3 e 4 camadas), a idade do reforço no ensaio de flexão (3, 7 e 28 dias) e o nível de fissuração prévia à execução do reforço (sem fissuração, fissuração prévia com aplicação de 50% e 100% da carga correspondente ao escoamento da viga). Com o intuito de melhorar a aderência entre o concreto têxtil e a viga que seria reforçada, o tratamento superficial adotado foi o jateamento de areia. Apesar do nome, a técnica foi realizada com granalhas de aço por exigência da lei municipal de Porto Alegre.

Quanto aos resultados da pesquisa, verificou-se que todas as vigas reforçadas tiveram aumento da capacidade resistente. Em comparação à viga testemunho, as cargas máximas obtidas no ensaio de flexão apresentaram aumento que variou de 30,34%, para a viga com 2 camadas de têxtil, a 81,82%, para a viga com 4 camadas de têxtil, sendo que o aumento médio da capacidade resistente foi de 31,15%, 54,25% e 72,00% nas vigas reforçadas com 2, 3 e 4 camadas, respectivamente.

Quanto à variável idade de ruptura, verificou-se que não há diferença significativa na capacidade resistente das vigas com reforço de 3, 7 e 28 dias, uma vez que a diferença observada ocorreu antes do patamar de escoamento da curva carga-deslocamento. Verificou-se que, para as vigas de menor idade, as cargas resistidas foram menores quando comparadas ao mesmo deslocamento das vigas com idade de 28 dias, indicando que a viga de maior idade apresentou uma rigidez maior no trecho entre a fissuração do concreto e o escoamento do aço.

Quanto à fissuração prévia, verificou-se que os dois níveis de fissuração podem afetar consideravelmente os valores da carga de fissuração e reduzir os valores da carga de escoamento, porém não apresentaram diferença significativa nos valores de carga máxima.

Ao final da pesquisa, Giese (2019) apontou que o modo de ruptura dos reforços de todas as vigas se deu por falha na ancoragem do têxtil (deslizamento no interior da matriz cimentícia), junto à abertura de uma fissura no centro da viga, resultando em uma queda abrupta da capacidade resistente. Nas vigas reforçadas com 4 camadas de têxtil, observou-se o descolamento do reforço na região central, concomitante à abertura da fissura em que se identificou o deslizamento, indicando que a limitação do reforço não se deu somente pela perda de aderência entre o têxtil e a matriz cimentícia, mas também pela falta de aderência entre a matriz cimentícia e o substrato.

1.1.2 Considerações sobre a pesquisa de Dalazen (2021)

O objetivo do trabalho de Dalazen (2021) foi conhecer o comportamento do concreto têxtil quando empregado como reforço à flexão de vigas em concreto armado. A escolha das configurações do programa experimental contou com 3 variáveis: o tipo de têxtil (fibra de vidro álcali-resistente ou fibra de carbono), o número de camadas de têxtil (3 ou 4 camadas) e o tratamento superficial da interface de reforço (apicoamento mecânico ou jateamento). Além disso, analisaram-se o modo de ruptura e o comportamento antes da falha. A partir do ensaio de flexão a 4 pontos, realizado a 28 dias da data do reforço, o programa experimental analisou 15 vigas, sendo 8 reforçadas com têxtil de fibra de carbono e 6 com têxtil de fibra de vidro álcali-resistente. Uma das vigas permaneceu sem reforço e foi utilizada como referência.

Quanto ao tipo de têxtil, verificou-se um aumento na carga máxima de até 85,5% nas vigas reforçadas com têxtil de fibra de carbono e de até 47% nas vigas reforçadas com têxtil de fibra de vidro. Em relação à análise teórica, verificou-se que as vigas reforçadas com têxtil de fibra de vidro atingiram cargas próximas às da verificação teórica, enquanto as vigas reforçadas com concreto têxtil de fibra de carbono apresentaram valores experimentais menores do que os encontrados analiticamente. Quanto ao número de camadas, 3 ou 4, as diferenças não foram significativas.

Quanto ao comportamento à flexão, verificou-se que as vigas reforçadas com concreto têxtil de fibra de carbono apresentaram fissuras mais dispersas ao longo do comprimento da viga,

diferentemente do que ocorreu com as vigas reforçadas com concreto têxtil de fibra de vidro, que apresentaram maior número de fissuras no centro do vão. Além disso, as vigas com reforço têxtil de fibra de vidro apresentaram uma região de pseudoductilidade maior do que as vigas reforçadas com têxtil de carbono.

Quanto à variável de tratamento superficial, verificou-se que o jateamento se mostrou eficaz, uma vez que as vigas com tratamento superficial por apicoamento mecânico apresentaram o modo de ruptura por descolamento do reforço, e as vigas jateadas apresentaram modo de ruptura devido ao esmagamento do concreto com ruptura do têxtil. A ruptura da viga-testemunho ocorreu pela deformação excessiva da armadura tracionada.

Para as vigas apicoadas, concluiu-se que houve falha na interface do reforço, causada pela utilização do martetele elétrico de 850 W. Acredita-se que o equipamento possa ter danificado a camada externa das vigas, causando microfissuras que se tornaram pontos de fragilidade quando o sistema viga-reforço foi solicitado.

1.2 DELINEAMENTO DA PESQUISA

Como visto nos estudos desenvolvidos por Giese (2019) e Dalazen (2021), há inúmeros parâmetros que influenciam no comportamento mecânico do concreto têxtil. Por ser um material compósito, assim como o concreto armado, o desempenho do concreto têxtil depende das características e propriedades da matriz, do reforço e do vínculo entre eles. Nesta perspectiva, alguns tipos de têxteis também podem ser considerados um material compósito, uma vez que multifilamentos de fibras (reforço) se encontram impregnados por um material polimérico (matriz). Logo, as ligações filamento-filamento, têxtil-matriz e matriz-substrato devem ser eficientes, de modo a conferir monoliticidade à estrutura reparada.

Nesta conjuntura, sabendo que a preparação das interfaces é uma das questões chave para obtenção de alta qualidade nas ligações entre os materiais, o principal desafio desta pesquisa é avaliar experimentalmente o comportamento de vigas de concreto armado reforçadas com concreto têxtil de fibra de vidro álcali-resistente de produção nacional em condições mais próximas à execução de um reforço em campo. Assim, busca-se contribuir para a elaboração de diretrizes e orientações técnicas, de modo que o reforço de estruturas de concreto armado com concreto têxtil se torne uma solução eficiente, viável e segura.

Com o objetivo de avaliar o comportamento do concreto têxtil, ao ser aplicado como reforço em condições semelhantes às aquelas encontradas em campo, como no caso de vigas que perderam parte da sua capacidade resistente, optou-se por trabalhar com vigas dimensionadas dentro do domínio 2, porém com uma pequena taxa de armadura longitudinal de tração. O emprego de vigas subarmadas busca se aproximar dos casos em que há perda de seção transversal nas barras metálicas devido à corrosão e/ou taxa de armadura insuficiente.

Com base nos resultados e conclusões das pesquisas de Giese (2019) e Dalazen (2021), verificou-se que a técnica de jateamento com granalhas de aço se mostrou eficaz. Por conseguinte, decidiu-se por manter a técnica para tratamento superficial do substrato. Do mesmo modo para o reforço, decidiu-se empregar 3 camadas de têxtil.

Quanto à interface têxtil-matriz, identifica-se a necessidade de melhorar a aderência entre a matriz e o reforço, uma vez que muitas vigas romperam por falta de ancoragem do têxtil. Tal fato pode ser explicado, em parte, pela ausência de impregnação no reforço, uma vez que o têxtil nacional utilizado é coberto por uma resina sem função estrutural, sendo responsável, apenas, por manter os filamentos unidos durante o manuseio.

Como primeira variável, definiu-se investigar o método de produção do compósito e o tipo de matriz mais adequada para se realizar o reforço. Denominou-se por “matriz 1”, as vigas reforçadas com argamassa polimérica industrializada através do método da laminação, e por “matriz 2”, as vigas reforçadas com argamassa autoadensável por meio do método da moldagem. Assim, busca-se analisar comparativamente as particularidades de cada técnica e o tipo de influência que exercem sobre a capacidade resistente do elemento reforçado.

Para a segunda variável escolheu-se trabalhar com a aderência do reforço à matriz. A partir do tratamento do têxtil, espera-se fazer com que os filamentos funcionem como uma unidade, melhorando a capacidade resistente do elemento reforçado. Neste sentido, na tentativa de melhorar a ancoragem mecânica na interface têxtil-matriz, torna-se relevante investigar a aplicação do reforço têxtil revestido com resina epóxi e com resina epóxi seguida de areia.

Dessa forma, dividiu-se o programa experimental em 3 etapas. Na primeira, desenvolvem-se as atividades anteriores à concretagem, tais como: aquisição dos materiais, definição do traço de concreto, montagem e instrumentação das armaduras. Incluem-se nessa etapa a preparação e a instrumentação do têxtil de fibra de vidro álcali-resistente e o jateamento das vigas, como apresentado no fluxograma da Figura 2.

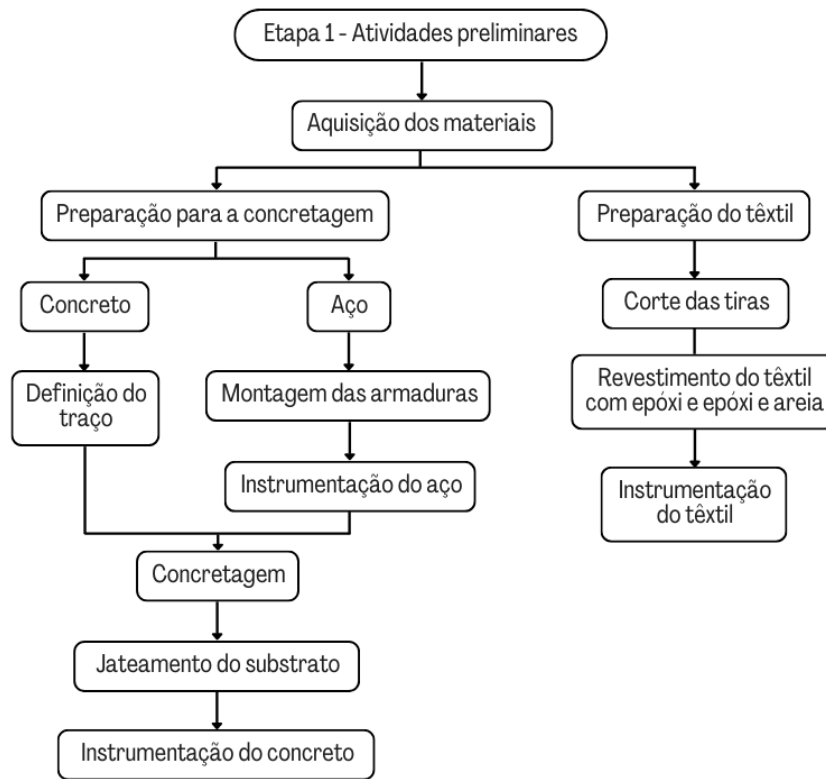


Figura 2 – Fluxograma da Etapa 1 (Fonte: Autor)

Na segunda etapa, tem-se a investigação das variáveis por lotes, a partir das técnicas de laminação e moldagem (com suas respectivas matrizes – argamassa polimérica industrializada ou argamassa autoadensável) e do tipo de revestimento do têxtil (sem revestimento, revestido com resina epóxi, revestido com resina epóxi e areia ou revestido com resina epóxi e areia somente nas extremidades).

Na terceira etapa, tem-se a caracterização experimental dos materiais (concreto, aço e argamassas de reforço), a análise teórica das vigas com e sem reforço e a realização dos ensaios de flexão a 4 pontos das vigas reforçadas, como apresentado na Figura 3. Somente o têxtil de fibra de vidro álcali-resistente não foi ensaiado à tração, uma vez que o material foi caracterizado por Dalazen (2021) e os resultados estão apresentados nesta pesquisa.

Deste modo, pretende-se dar continuidade aos trabalhos experimentais sobre concreto têxtil realizados no LEME da UFRGS. Através da reprodução de condições mais próximas à execução de um reforço em campo, busca-se identificar as dificuldades, limitações, adaptações e outros fatores necessários para a validação do uso do compósito como reforço de estruturas de concreto armado deterioradas.

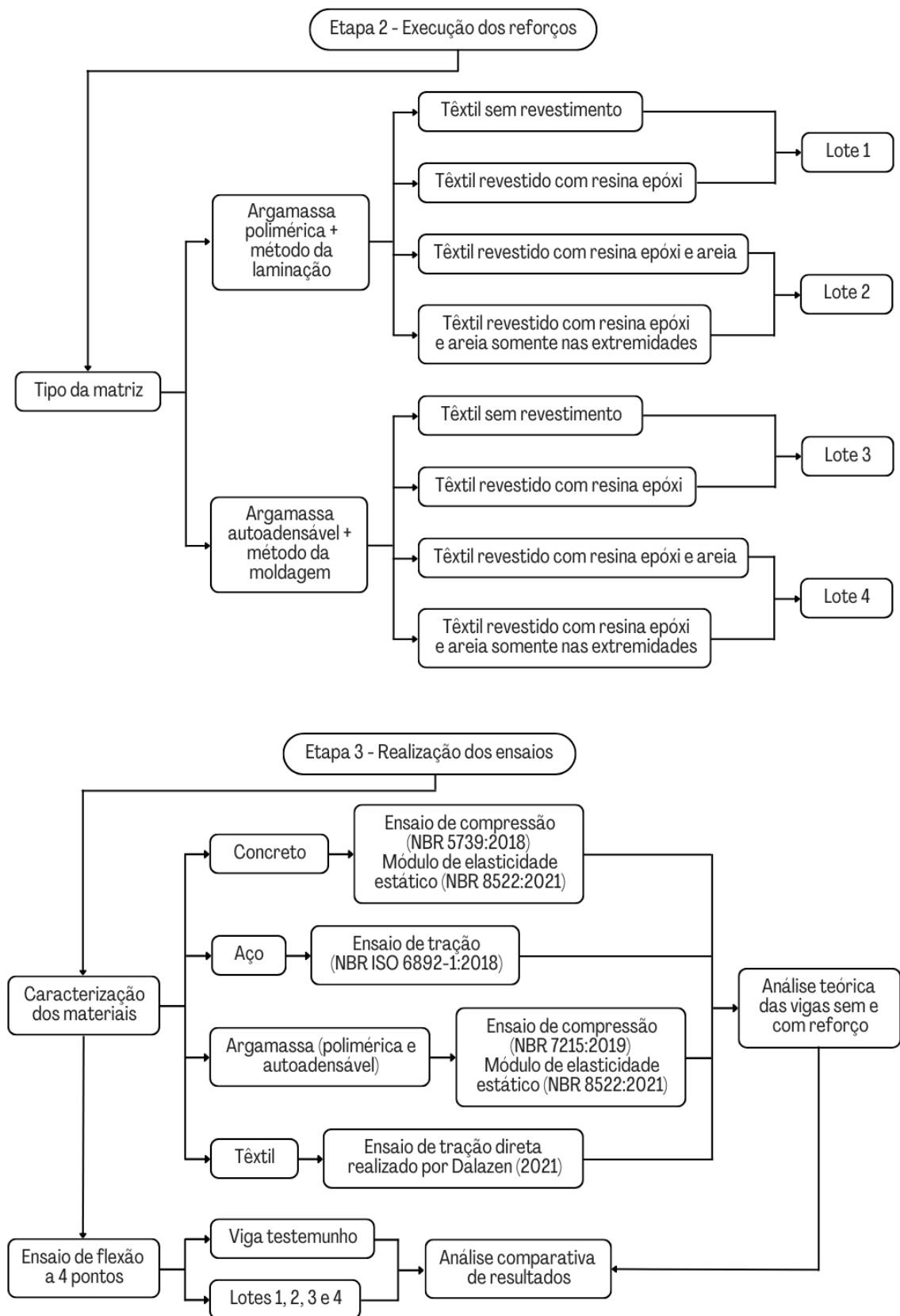


Figura 3 – Fluxograma das Etapas 2 e 3 (Fonte: Autor)

1.3 OBJETIVOS

Os objetivos da pesquisa compreendem o objetivo geral e os objetivos específicos.

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é analisar experimentalmente o comportamento mecânico de vigas de concreto armado, quando reforçadas com concreto têxtil de fibra de vidro álcali-resistente (AR) em condições mais próximas de um reforço em campo. Com o programa experimental, busca-se investigar como as variáveis “matriz cimentícia” e “tratamento do têxtil” influenciam, positiva ou negativamente, o desempenho do elemento em relação à carga máxima resistida no ensaio de flexão a 4 pontos.

1.3.2 Objetivos específicos

O presente trabalho tem como objetivos específicos:

- a) Caracterizar os materiais utilizados na pesquisa por meio de ensaios normatizados;
- b) Realizar a análise teórica das vigas com e sem reforço;
- c) Identificar as particularidades executivas dos métodos de laminação e moldagem;
- d) Avaliar o desempenho das vigas quanto à carga máxima;
- e) Identificar o comportamento das vigas reforçadas à flexão;
- f) Analisar se o revestimento do têxtil altera o desempenho mecânico do sistema viga-reforço;
- g) Analisar os modos de ruptura e os deslocamentos-limites;
- h) Avaliar os fatores ductilidade e tenacidade;
- i) Comparar os resultados teóricos e experimentais.

1.4 LIMITAÇÕES

Neste trabalho, propõe-se estudar o comportamento mecânico de vigas de concreto armado reforçadas à flexão com concreto têxtil de fibra de vidro álcali-resistente com diferentes configurações. Definiu-se trabalhar com vigas reforçadas através dos métodos de moldagem e laminação, utilizando-se matrizes distintas para cada técnica (argamassa autoadensável e argamassa industrializada). Ademais, a partir de investigações existentes na literatura, definiu-se trabalhar com diferentes tipos de revestimento para o têxtil (resina epóxi e areia).

Deste modo, são limitações da pesquisa:

- a) A composição das matrizes não considera requisitos de durabilidade do reforço têxtil, uma vez que, dada a relevância da variável, acredita-se ser necessário um estudo particularizado;
- b) Para a definição das matrizes cimentícias, considerou-se como pré-requisitos básicos: a disponibilidade de materiais no laboratório, resistências à compressão semelhantes e propriedades adequadas à produção do concreto têxtil para ambas as técnicas de reforço;
- c) Devido a disponibilidade de recursos, realizou-se a aquisição dos materiais e serviços em intervalos irregulares de tempo;
- d) O serviço de jateamento (tratamento do substrato de concreto) ocorreu 220 dias após a concretagem;
- e) Os reforços foram realizados com as vigas na posição invertida (usual de laboratório);
- f) Ajustou-se o cronograma do programa experimental, considerando a disponibilidade de equipamentos e operadores, a fim de que todos os ensaios fossem realizados aos 28 dias;
- g) Na data dos ensaios de flexão, as vigas dos lotes 1, 2, 3 e 4 encontravam-se com 263, 268, 287 e 294 dias, respectivamente.

1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente pesquisa está estruturada em 5 capítulos, como descritos a seguir:

O primeiro capítulo introduz o tema e apresenta os objetivos da pesquisa. Incluiu, também, considerações sobre estudos anteriormente realizados na área de interesse.

O segundo capítulo traz a revisão bibliográfica sobre o tema da pesquisa. Abordam-se a definição de concreto têxtil, sua origem, composição, características e propriedades mecânicas e tópicos relevantes sobre sua aplicação como reforço estrutural.

O terceiro capítulo apresenta a estrutura do programa experimental, as variáveis da pesquisa, os parâmetros (variáveis fixas), a descrição e a caracterização dos materiais. Traz, ainda, a descrição das etapas de concretagem, instrumentação, execução dos reforços e realização dos ensaios.

O quarto capítulo apresenta e discute os resultados da pesquisa.

O quinto capítulo discorre sobre as conclusões e faz, também, recomendações para trabalhos futuros.

2 CONCRETO TÊXTIL

Os materiais compósitos constituem uma classe muito ampla e importante dos materiais de engenharia. Devido à grande variedade de aplicações, estão por toda a parte. Sua principal característica é serem constituídos por duas ou mais fases distintas, denominadas matriz e reforço, que combinadas podem criar um material de melhor desempenho (HERAKOVICH, 1998). Um exemplo clássico é a madeira, um compósito natural em que cadeias fibrosas de celulose são envolvidas por uma matriz de lignina (HULL; CLYNE, 1996).

De modo geral, a matriz é responsável por dar forma ao compósito, além de proteger e manter o reforço na posição correta. O reforço, por sua vez, é responsável por melhorar as propriedades da matriz, conferindo-lhe, por exemplo, resistência, rigidez e condutividade elétrica. Em geral, o reforço pode ser empregado na forma de partículas, lâminas, fibras, malhas, mantas, cabos, barras, entre outros.

Originado do concreto reforçado com fibras, o concreto têxtil pode ser considerado um compósito inovador no qual uma ou mais camadas de reticulados têxteis não metálicos são dispostos de maneira orientada no interior de uma matriz cimentícia de granulometria fina, geralmente de alta resistência à compressão, com o objetivo de promover resistência aos esforços de tração. A diferença entre os compósitos relaciona-se ao desempenho mecânico, uma vez que, no concreto reforçado com fibras poliméricas, as fibras são curtas e dispersas aleatoriamente no interior da matriz, não tendo a sua capacidade resistente explorada totalmente (BROCKMANN, 2005; BRUCKERMANN, 2007).

Em relação ao concreto armado, o concreto têxtil apresenta inúmeras vantagens. Devido à resistência dos têxteis à corrosão, a camada mínima de concreto, essencial para a proteção do aço, pode ser reduzida, tornando possível a fabricação de elementos de pequena espessura. Neste sentido, contudo, efeitos da ação de altas temperaturas devem ser analisados. Além disso, a presença do têxtil na matriz limita a fissuração, enquanto a disposição orientada do reticulado promove alta resistência à tração e ao impacto (BRUCKERMANN, 2007). Assim, pode-se afirmar que o concreto têxtil combina as vantagens do concreto armado e do concreto reforçado com fibras (HEGGER et al., 2006). Na Figura 4, é ilustrado um comparativo da disposição do reforço no interior da matriz dos diferentes compósitos de concreto.



Figura 4 – Comparativo da disposição do reforço em compostos de concreto (Fonte: Adaptado de HEGGER et al., 2006)

Devido ao grande potencial técnico e econômico do concreto têtil, duas áreas especiais de pesquisa, Centro de Pesquisa Colaborativa 528 - Reforços têteis para reforço estrutural e reparo (*Sonderforschungsbereich 528 - Textile Bewehrungen zur bautechnischen Verstärkung und Instandsetzung*) e Centro de Pesquisa Colaborativa 532 - Concreto reforçado com têteis - desenvolvimento de um novo tipo de tecnologia (*Sonderforschungsbereich 532 - Textilbewehrter Beton - Grundlagen für die Entwicklung einer neuen Technologie*), foram criadas pela Fundação Alemã de Pesquisa (*Deutsche Forschungsgemeinschaft, DFG*) em 1999, e estudadas até 2011 nos centros de pesquisa das Universidades de Dresden, *TU Dresden*, e Aachen, *RWTH Aachen University*, respectivamente (BRUCKERMANN, 2007; SCHEERER et al., 2015). Ao longo de doze anos, os pesquisadores dos grupos CPC 528 e CPC 532 (SFB 528 e SFB 532, na língua alemã) empenharam-se para estudar o emprego dos reforços têteis em matrizes cimentícias.

Concomitante ao desenvolvimento das pesquisas na Alemanha e com o avanço para o cenário internacional, verifica-se a realização de estudos importantes no Brasil, China, Estados Unidos, Espanha, França, Itália, Israel, Japão, Reino Unido e Suécia (DENARDI, 2016). Desse modo, criou-se uma base de conhecimentos científicos que permitiu a aplicação efetiva do material em diversas obras, tais como: painéis de fachada, painéis de proteção contra ruídos, lajes, pontes, estruturas de reforço, entre outras (HEGGER et al. 2006; BÜTTNER, 2012; SCHEERER et al., 2015).

De acordo com Scheerer et al. (2015), mesmo que a técnica do concreto têtil ainda não esteja amplamente regulamentada, verifica-se um posicionamento da indústria internacional quanto

à produção dos reforços têxteis de fibra vidro álcali-resistente e de carbono. De fato, é possível encontrar empresas como Saint-Gobain Adfors, Saint-Gobain Vetrotex, Solidian e Teijin que comercializam têxteis voltados para construção civil.

No âmbito nacional, é visível a ausência de produtos voltados ao compósito. Percebe-se que tanto a comunidade acadêmica, quanto a indústria da construção civil desconhecem o concreto têxtil e suas potencialidades. Os materiais nacionais que mais se aproximam do reticulado têxtil são as telas de fibra de vidro álcali-resistente das empresas Fibertex e Texiglass. Ambos os materiais apresentam gramatura e resistência à tração próximas às dos têxteis utilizados em pesquisas internacionais, porém não são impregnados com polímero estrutural durante o processo de fabricação.

2.1 REFORÇO TÊXTIL

Basicamente, o concreto têxtil é formado da união entre uma matriz de cimento hidráulico e um reforço têxtil bidimensional ou tridimensional. Este, por sua vez, é constituído por fibras de alto desempenho mecânico que se apresentam na forma de fios. A configuração do reforço depende da maneira como os fios se conectam uns aos outros, como apresentado na Figura 5.

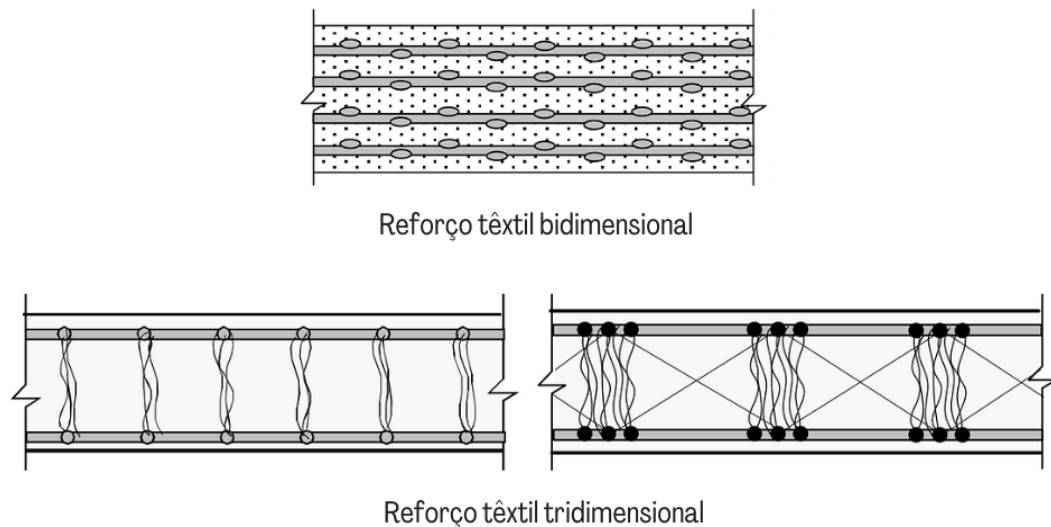


Figura 5 – Tipos de reforços têxteis (Fonte: Adaptado de NAAMAN, 2010)

Dentro das atividades que envolvem a produção do reforço têxtil, existem termos específicos da engenharia e da indústria têxtil para se referir aos materiais, às técnicas de produção dos fios e às formas de configuração do reforço. Em vista disso, o *Textile Reinforced Concrete* -

State-of-the-Art Report of RILEM TC 201-TRC apresenta, no Capítulo 2 (ALDEA et al., 2006), as definições para os termos usualmente encontrados na literatura. Destacam-se alguns termos comumente utilizados:

- a) Fibra (*fiber*): matéria-prima natural ou manufaturada que constitui o elemento básico do reforço têxtil, sendo caracterizada por ter o comprimento maior ou igual a 100 vezes o valor do diâmetro ou da espessura;
- b) Filamento (*filament*): fibra de grande comprimento;
- c) Fio (*yarn*): monofilamento ou conjunto de filamentos alinhados, entrelaçados ou torcidos que estão aptos para serem empregados na produção do reforço têxtil;
- d) Impregnação (*impregnation*): entrada de líquido entre os filamentos que compõe cada fio da malha têxtil, podendo ocorrer em diferentes graus (a impregnação completa implica que não há ar residual nos interstícios dos fios);
- e) Revestimento (*coating*): material adesivo aplicado após a tecelagem para proteger e unir os filamentos, a fim de estabilizar estruturalmente os fios;
- f) Tex (*tex*): unidade que expressa a densidade linear de um elemento têxtil (fibra, fio ou filamento), sendo definida como a quantidade de gramas por quilômetro (g/km) de elemento, ou seja, quanto menor o valor de "tex", mais fino é o fio;
- g) Urdume (*warp*): fios que se estendem longitudinalmente e paralelos à borda do têxtil, sendo, em geral, posicionados na direção do principal esforço solicitante;
- h) Trama (*weft*): fios que correm perpendicularmente ao urdume e vão de uma borda a outra do têxtil.

De acordo com Hanisch et al. (2006), o reforço têxtil pode ser produzido a partir de diferentes técnicas. O tipo de processamento dos fios e o método de tecelagem influenciam nas propriedades do têxtil, levando a um desempenho diferente do reforço. Um fio de formato circular, por exemplo, tem um pequeno número de filamentos externos e muitos filamentos internos. Em contrapartida, um fio mais plano, de forma elíptica, pode ter quase todos os filamentos externos e poucos no núcleo (HARTIG, 2011). Tal configuração origina materiais com resistências diferentes. A estrutura típica do fio têxtil é apresentada na Figura 6.

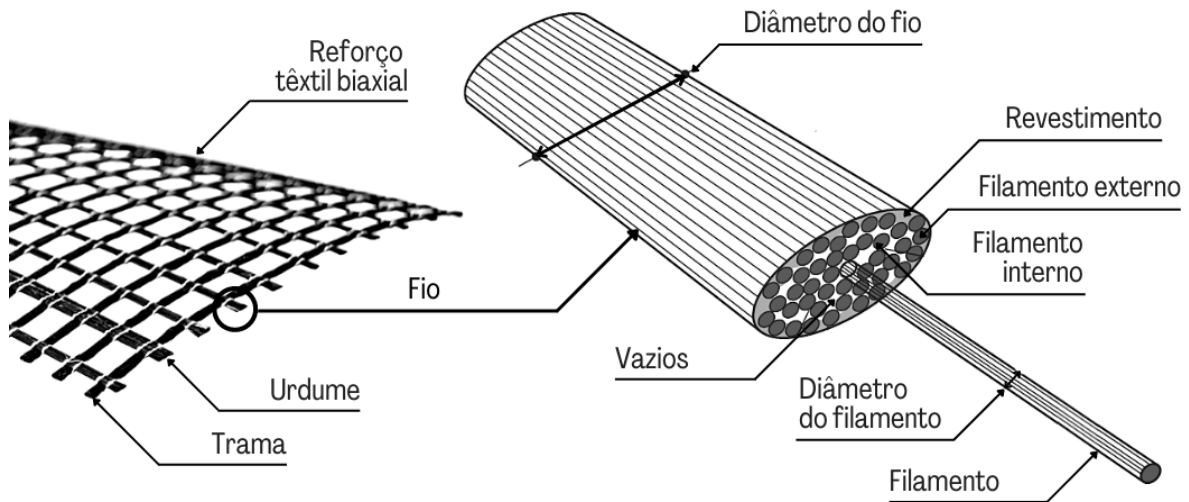


Figura 6 – Estrutura do fio têxtil (Fonte: Adaptado de VALERI et al., 2018)

2.1.1 Geometria dos têxteis

De acordo com Gries et al. (2016), os reforços têxteis são capazes de sustentar cargas em uma ou mais direções, e variam de acordo com a geometria e a técnica de fabricação. Quanto à geometria, os têxteis podem ser classificados em bidimensionais e tridimensionais.

Os têxteis bidimensionais são aqueles reforçados em duas ou mais direções, sendo tipicamente empregados na produção de laminados finos e no reforço de estruturas. Também chamados de estruturas têxteis planas, os têxteis bidimensionais mais usuais encontram-se na forma de tecidos (*woven fabrics*), malhas (*knitted fabrics*) e não tecidos (*nonwoven fabrics*). O têxtil tridimensional, por sua vez, apresenta geometria complexa e tem sido estudado para aplicação em painéis laminados, elementos de fachada e revestimentos.

2.1.1.1 Tecidos

São estruturas têxteis produzidas por meio de tecelagem, cuja técnica consiste no entrelaçamento de dois ou mais fios em ângulos retos. Neste tipo de têxtil, os fios apresentam uma geometria ondulada, com a trama passando, ora por cima, ora por baixo do urdume, conforme apresentado na Figura 7.

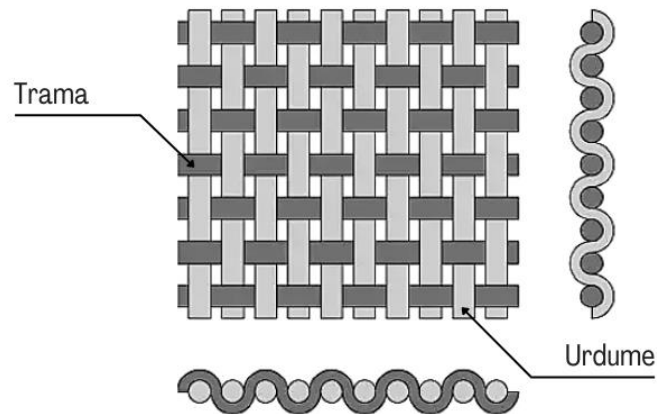


Figura 7 – Tecido do tipo simples (Fonte: Adaptado de PELED et al., 2017)

Para aplicações na engenharia civil, contudo, é empregado um tecido bidimensional com estrutura do tipo leno. Em comparação aos tecidos convencionais do tipo simples, a tecelagem leno apresenta, geralmente, dois fios de urdume torcidos em torno de um fio de trama, conforme apresentado na Figura 8. Nos tecidos do tipo leno, o reforço têxtil é manufacturado com a estrutura mais aberta, com fios perpendiculares ou em orientações diferentes, sendo denominado de telas biaxiais e multiaxiais, respectivamente.

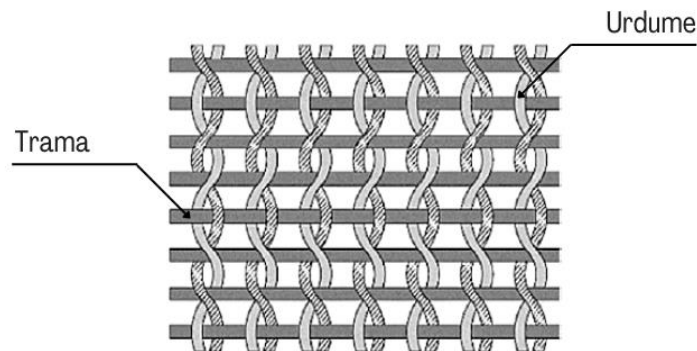


Figura 8 – Tecido do tipo leno (Fonte: Adaptado de PELED et al., 2017)

2.1.1.2 Malhas

Nos têxteis do tipo malha, os fios são entrelaçados por meio de tricotagem. De modo geral, as malhas podem ser divididas em dois grupos, diferenciando-se em relação à disposição dos fios tricotados. Quando estes, encontram-se dispostos ao longo do comprimento do têxtil, denominam-se malhas de urdume (*warp-knitted fabrics*). Logo, quando os têxteis apresentam os fios tricotados no sentido da largura, denominam-se malhas de trama (*weft-knitted fabrics*) (GRIES et al., 2016). A Figura 9 ilustra uma configuração de malhas de urdume e de trama.

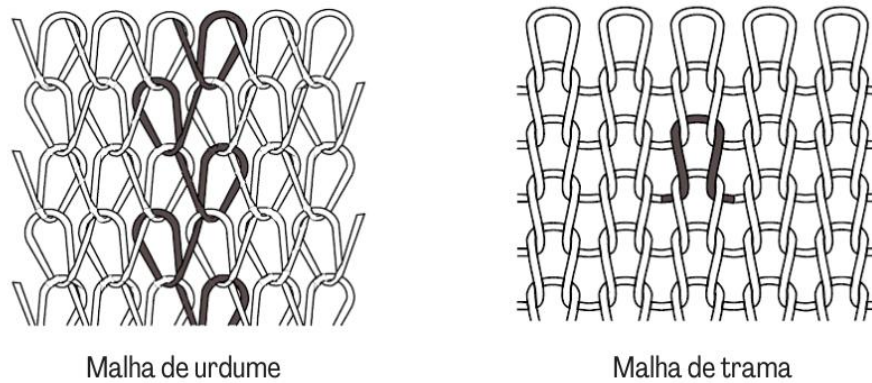


Figura 9 – Malhas de urdume e de trama (Fonte: Adaptado de GRIES et al., 2015)

Os têxteis de malha de trama são produzidos em máquinas de tricotar e apresentam uma estrutura de fios ondulados, sendo muito empregados na fabricação de roupas. A aplicação em materiais compósitos também é possível, no entanto, os têxteis de malha de trama apresentam uma resistência inferior quando comparados com outros tipos de têxteis. Os têxteis de malha de urdume, por outro lado, apresentam um desempenho superior significativo quando comparados aos têxteis de malha de trama, sendo muito utilizados como reforço em diversos materiais compósitos, incluindo àqueles para aplicações de engenharia civil (GRIES et al., 2016).

De acordo com Gries et al. (2016), a tecnologia atual de fabricação de têxteis para uso na construção civil combina os benefícios da tecelagem e da tricotagem. Como resultado, têm-se estruturas mais resistentes que os têxteis produzidos por tecelagem. Os têxteis de malha de urdume podem ser uniaxiais, biaxiais ou multiaxiais, como pode ser visto na Figura 10.

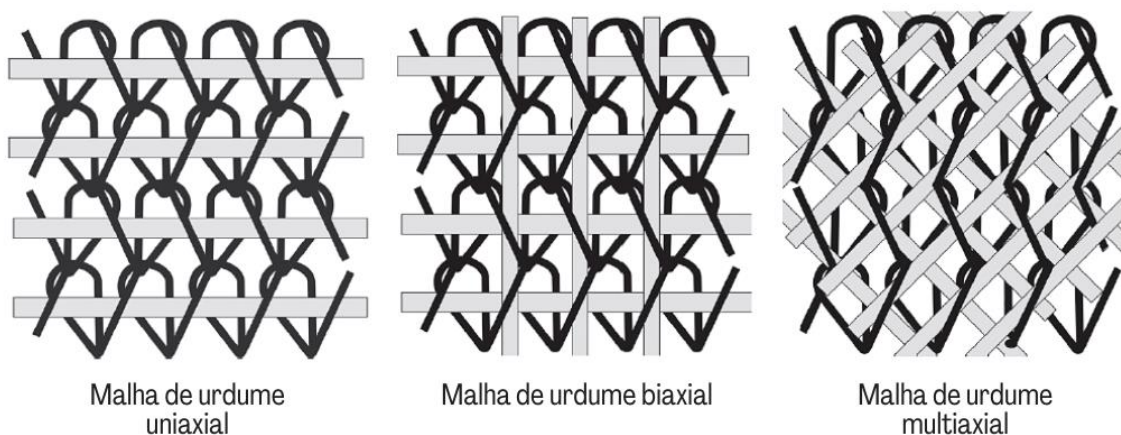


Figura 10 – Tipos de malhas de urdume (Fonte: Adaptado de GRIES et al., 2016)

Nas malhas de urdume uniaxiais, fios de trama são inseridos no sentido da largura do têxtil, perpendicularmente aos fios de urdume. Deste modo, são capazes de sustentar cargas em uma direção específica. Nas malhas biaxiais, fios horizontais e verticais são combinados com a malha de urdume, sendo capazes de suportar cargas em duas direções. Quando fios adicionais são introduzidos com diferentes orientações e/ou camadas, têm-se as malhas multiaxiais.

As propriedades dos têxteis de malha de urdume são influenciadas pelo tipo de tricô. Embora haja uma variedade de pontos de tricô, apenas um número limitado deles é utilizado para a produção de reforços têxteis. Os dois tipos mais empregados são os pontos do tipo pilar e do tipo tricô, apresentados na Figura 11.

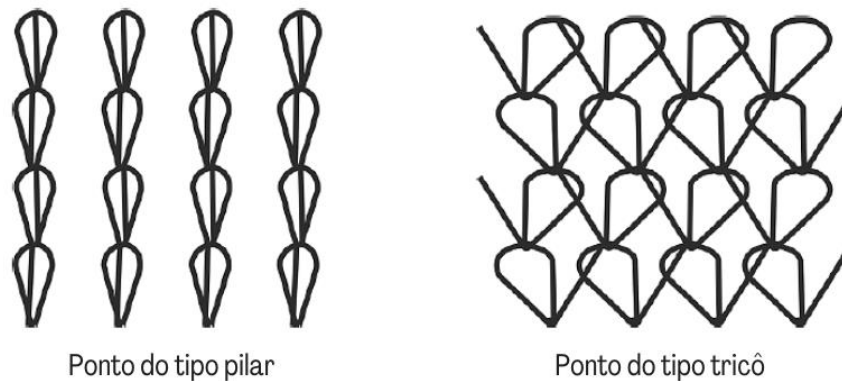


Figura 11 – Pontos do tipo pilar e do tipo tricô (Fonte: Adaptado de GRIES et al., 2016)

Nos têxteis de malha de urdume com ponto do tipo tricô, a superfície de contato entre os fios e o concreto é maior que nos têxteis com ponto do tipo pilar. Isso ocorre devido ao formato mais plano da seção transversal dos fios horizontais e verticais que são incorporados para a produção do reforço, como verificado na Figura 12. De acordo com Roye (2007), os têxteis de malha de urdume com ponto do tipo tricô apresentam maior capacidade de carga que os têxteis com ponto do tipo pilar, cuja geometria dos fios de urdume é circular, como apresentado na Figura 13.

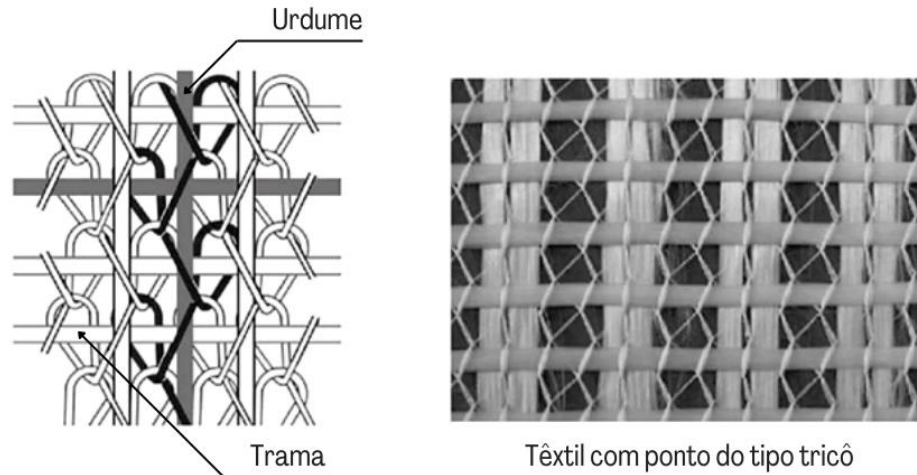


Figura 12 – Desenho representativo e imagem de têxtil com ponto do tipo tricô (Fonte: Adaptado de PELED et al., 2017)

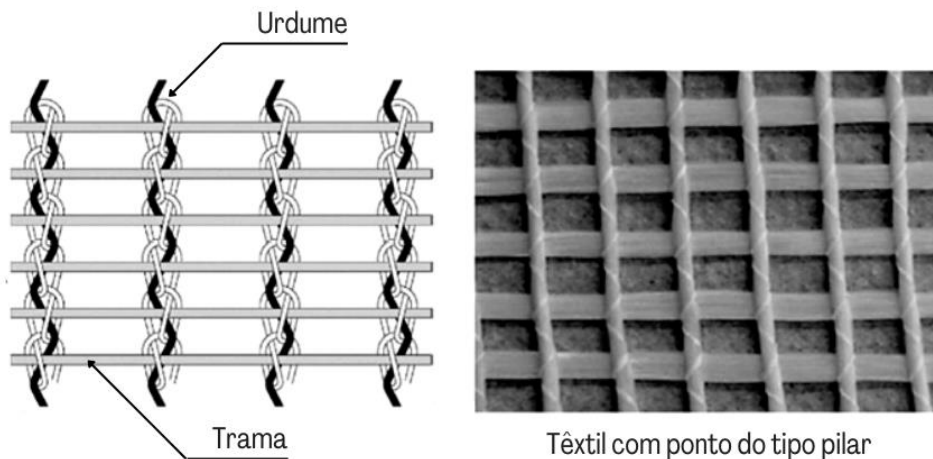


Figura 13 – Desenho representativo e imagem de têxtil com ponto do tipo pilar (Fonte: Adaptado de PELED et al., 2017)

Devido ao formato de fita, é possível verificar que o espaçamento entre os fios do têxtil com pontos do tipo tricô é menor em comparação com os têxteis com pontos do tipo pilar.

Koch et al. (2015) analisaram um terceiro tipo de ponto para a confecção do têxtil de malha de urdume. Trata-se do ponto tipo simples, apresentado na Figura 14, cuja geometria da seção transversal apresenta mais filamentos externos que internos. Logo, os autores analisaram a influência que os diferentes pontos de costura exerciam em algumas propriedades mecânicas do concreto têxtil, comparando-as entre si, como apresentado na Tabela 1.

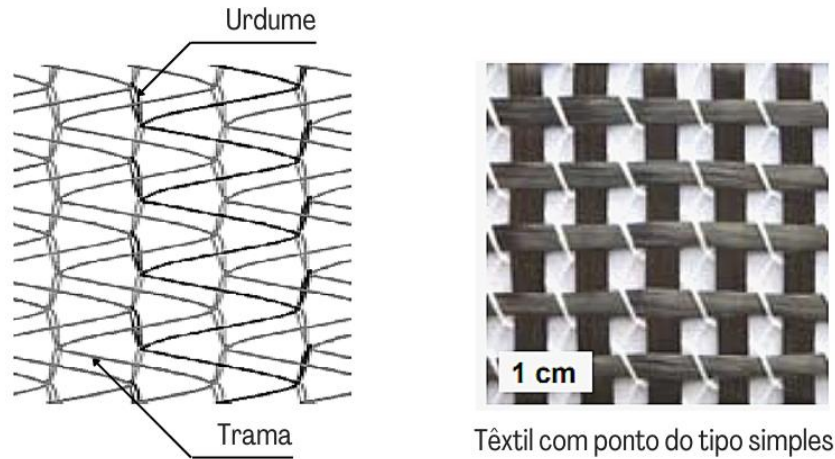


Figura 14 – Desenho representativo e imagem de têxtil com ponto do tipo simples (Fonte: Adaptado de KOCH et al., 2015)




<i>Tipo de ponto de costura</i>	<i>Pilar</i>	<i>Tricô</i>	<i>Simplex</i>
Geometria da seção transversal do fio de urdume			
Aderência têxtil-matriz	Baixa	Média	Boa
Rigidez à flexão	Alta	Média	Baixa
Resistência ao deslizamento	Alta	Média	Baixa

Tabela 1 – Influência do tipo de ponto de costura em propriedades do concreto têxtil (Fonte: Adaptado de KOCH et al., 2015)

Os têxteis de malha de urdume também podem ser fabricados com reforços em áreas específicas com a adição de fios durante o processo de fabricação ou em etapa posterior, por meio de técnicas especiais de costura (KOLKMANN et al., 2005).

2.1.1.3 Não tecidos

São estruturas têxteis produzidas por intertravamento mecânico de fibras ou colagem, realizada com auxílio de agentes químicos, térmicos e suas combinações. São caracterizados por serem obtidos diretamente pelo processamento da matéria-prima, não necessitando de fiação (GRINGS, 2020). A Figura 15 apresenta um tipo de têxtil cuja estrutura é formada a partir de adesão química de fios.

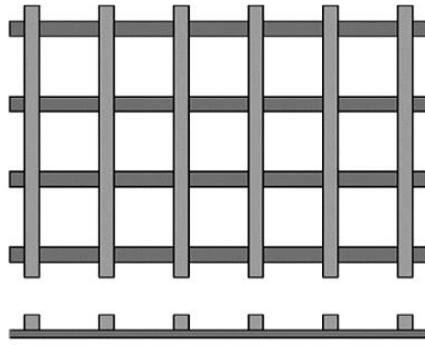


Figura 15 – Têxtil com estrutura colada (Fonte: PELED et al., 2017)

As propriedades relevantes dos têxteis não tecidos para a engenharia civil incluem a porosidade e a natureza isotrópica, sendo empregados, por exemplo, em estruturas de drenagem e de distribuição de fluidos (GRIES et al., 2016).

2.1.2 Tipos de fibras

Atualmente, uma grande variedade de fibras está disponível, no entanto, apenas alguns tipos são adequados para serem empregados em matrizes cimentícias. As propriedades dos diferentes tipos de fibras variam consideravelmente, influenciando o desempenho dos materiais compósitos de que fazem parte. Assim, são os requisitos de cada compósito que determinam o tipo de fibra e o tipo de têxtil a ser utilizado. Alguns tipos de fibras e suas classificações são apresentados na Figura 16.

As fibras são comumente caracterizadas como de alto ou baixo módulo, se tiverem módulo de elasticidade superior ou inferior ao do concreto endurecido, respectivamente. Fibras de aço, aramida, basalto, carbono e vidro álcali-resistente são classificadas como fibras de alto módulo, ao passo que as fibras de álcool polivinílico (PVA), polietileno e sisal são matérias primas consideradas de baixo módulo.

De modo geral, as fibras de alto módulo são mais adequadas para uso em matrizes cimentícias do que as fibras de baixo módulo, pois aumentam a resistência e a tenacidade do compósito, ao melhorarem o seu comportamento no estado plástico. As fibras de baixo módulo, por sua vez, aumentam a ductilidade da matriz, mas não a sua resistência. Neste sentido, Peled et al. (2017) apresenta os valores de determinadas propriedades para alguns tipos de fibras, como pode ser visto na Tabela 2.

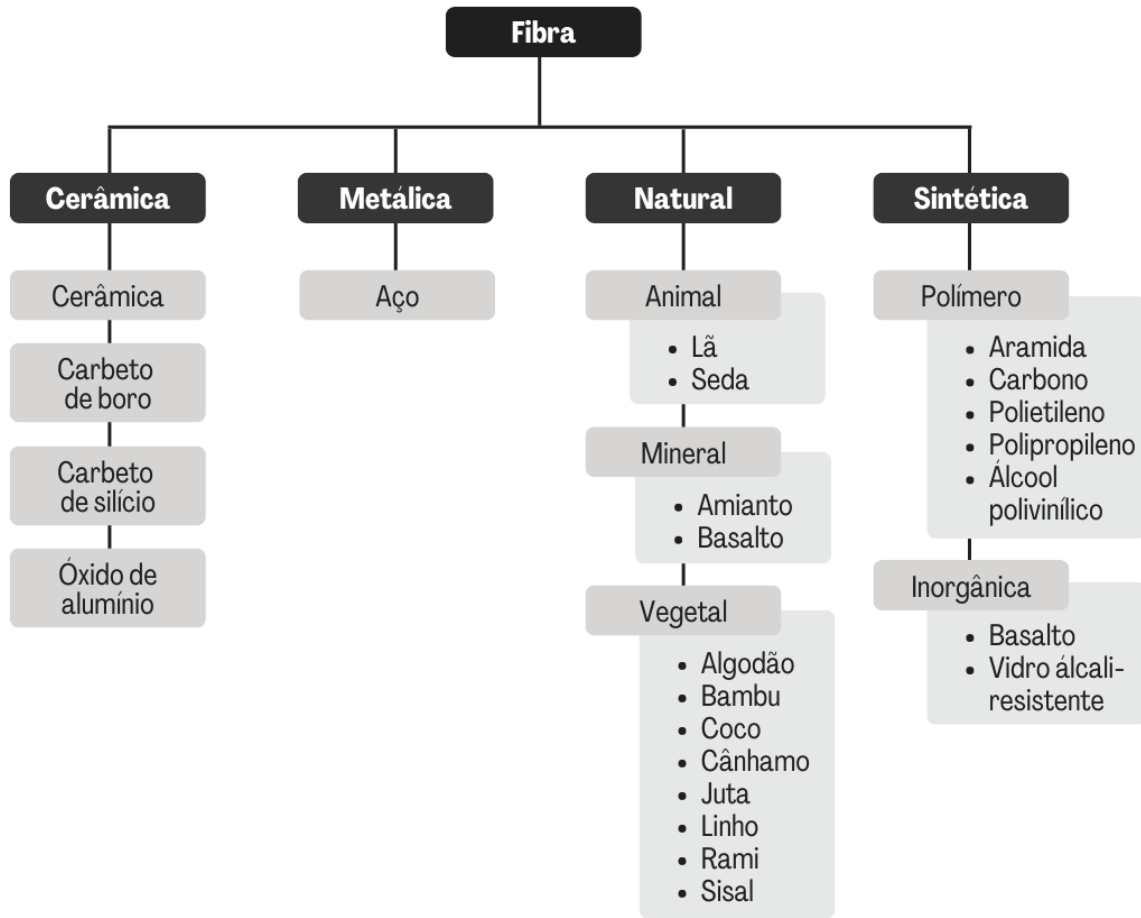


Figura 16 – Tipos de fibras (Fonte: Adaptado de PELED et al., 2017)

<i>Tipo de fibra</i>	<i>Resistência à tração (MPa)</i>	<i>Módulo de elasticidade (GPa)</i>	<i>Deformação última (%)</i>	<i>Densidade (g/cm³)</i>
Aço	1200	200	3 - 4	7,85
Álcool polivinílico (PVA)	880 - 1900	25 - 41	6 - 10	1,3
Amianto	620	160	-	2,55
Aramida	3000	60 - 130	2,1 - 4	1,4
Basalto	3000 - 4840	79,3 - 93,1	3,1	2,7
Carbono	3500 - 6000	230 - 600	1,5 - 2	1,6 - 1,95
Cerâmica (boro/silicone)	800 - 3600	360 - 480	0,79	2,4 - 2,6
Dyneema (HDPE)	2000 - 3500	50 - 125	3 - 6	0,97
Polietileno	250	1,4 - 2,2	10 - 15	0,95
Polipropileno	140 - 690	3 - 5	25	0,9 - 0,95
Sisal	600 - 700	38	2 - 3	1,33
Vidro álcali-resistente	2500	70	3,6	2,78

Tabela 2 – Propriedades de alguns tipos de fibras (Fonte: Adaptado de PELED et al., 2017)

Quanto ao uso em matrizes cimentícias, as fibras devem ser capazes de manter suas propriedades em ambientes alcalinos, além de apresentarem alta resistência mecânica (à tração e ao cisalhamento), tenacidade elevada e módulo de elasticidade superior ao do concreto. Para aplicações de engenharia, as principais fibras, disponíveis comercialmente, são de vidro álcali-resistente, carbono, aramida e basalto.

2.1.2.1 Fibras de aramida

Denominadas quimicamente de poliparafenileno tereftalamida, as fibras de aramida são materiais de alta resistência e alto módulo. Mecanicamente, embora pouco resistentes à compressão, as fibras de aramida são caracterizadas pela tenacidade elevada, resistência a impactos, resistência à fluência e falha por fadiga. Além disso, são resistentes à combustão e estáveis em temperaturas relativamente elevadas, sendo capazes de manter suas propriedades mecânicas entre $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2016).

De acordo com Bisby (2016), as fibras de aramida apresentam alta estabilidade térmica, no entanto oxidam em temperaturas superiores a $150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nesse sentido, Peled et al. (2017) salienta que as fibras de aramida apresentam perda da maior parte de sua resistência ao serem submetidas a temperaturas superiores a $300\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Quanto ao uso como reforço em matrizes cimentícias, embora as fibras de aramida sejam descritas na literatura como resistentes à maioria dos ácidos e álcalis comuns, Büttner (2012) afirma que o emprego de fibras de aramida, em matrizes cimentícias de pH superior a 12, reduz a sua resistência em cerca de 60%. Além disso, as fibras de aramida apresentam característica higroscópica, ou seja, são capazes de absorver água do ambiente. Deste modo, podem apresentar problemas de aderência e de durabilidade, uma vez que, presentes em ambientes com alto teor de umidade, as fibras tendem a fissurar e a rachar. De acordo com Morgan e Allred (1989) apud Peled et al. (2017), as fibras de aramida também são sensíveis à luz ultravioleta, no entanto, esta característica é menos prejudicial em compósitos que as fibras se encontram imersas numa matriz.

Comercialmente, as fibras de aramida se apresentam por diferentes designações, como Kevlar e Nomex, e podem ser encontradas nas formas de fio, manta e tecido. De acordo com Callister Jr. e Rethwisch (2016), as fibras de aramida são frequentemente utilizadas em compósitos poliméricos a base de epóxis e poliésteres. Suas aplicações incluem produtos balísticos, como

coletes e blindagens de veículos, artigos esportivos, pneus, cabos, cordas, carcaças de mísseis, vasos de pressão, revestimentos de embreagens, gaxetas, entre outros.

2.1.2.2 Fibras de basalto

As fibras de basalto podem ser de origem natural ou sintética. A primeira, por ser origem vulcânica, pode apresentar variabilidade de propriedades (ARAÚJO, 2019). O interesse na utilização de fibras de basalto para o reforço de compósitos cimentícios tem aumentado nos últimos anos, devido, principalmente, ao crescimento das aplicações em compósitos de matrizes cerâmicas e poliméricas.

De acordo com Rambo (2016), as fibras de basalto de origem mineral são produzidas a partir da fusão de rochas basálticas em temperaturas de aproximadamente 1500 °C. Embora incomuns no mercado brasileiro, as fibras de basalto possuem densidade menor que a do aço, sendo comparáveis às fibras de vidro e de carbono. Do ponto de vista econômico, o custo de fabricação das fibras de basalto é menor que o das fibras de carbono e, quando comparadas às fibras de vidro, a produção das fibras de basalto é mais simples, devido à sua composição química, que não exige a adição de material secundário durante o processo de fabricação (PELED et al., 2017).

Os filamentos produzidos a partir das fibras de basalto são, na maioria das vezes, empregados como reforço em materiais poliméricos, no entanto, possuem potencial para aplicações em compósitos cimentícios. Além de excelentes propriedades térmicas, sendo capazes de suportar temperaturas contínuas de até 1200 °C, em atmosfera inerte ou oxidante, as fibras de basalto possuem boa resistência aos ambientes alcalinos com valores elevados de pH, como 13 e 14 (PELED et al., 2017).

Em relação à durabilidade das fibras de basalto, ressalta-se que há, na literatura, informações contraditórias quanto à magnitude da resistência aos álcalis, o que, de fato, contribui para a não utilização do material.

2.1.2.3 Fibras de carbono

São fibras de alto desempenho mecânico, comumente utilizadas em compósitos avançados de matriz polimérica. De acordo com Callister Jr. e Rethwisch (2016), a maioria das fibras de carbono são produzidas a partir de poliácridonitrila (PAN), *rayon* (polímero celulósico) e piche (alcatrão de petróleo ou de carvão). As técnicas de fabricação das fibras de carbono são

relativamente complexas, uma vez que os processos e as propriedades das fibras variam significativamente com o material-base utilizado para produzi-las.

De acordo com Peled et al. (2017), as fibras de carbono de poliacrilonitrila possuem qualidade superior, em termos de propriedades mecânicas, em comparação às fibras derivadas do piche, porém apresentam um custo mais elevado. Logo, como o piche é uma matéria-prima mais acessível e origina fibras com boas propriedades mecânicas, as fibras de carbono de piche são preferíveis economicamente.

De modo geral, as fibras de carbono apresentam excelente resistência à tração, alto módulo de elasticidade na direção longitudinal, baixa densidade, alta rigidez, baixa expansão térmica e ruptura frágil. À temperatura ambiente, as fibras de carbono não são afetadas pela umidade e por uma grande variedade de solventes, ácidos e bases, fatores importantes para o uso em compósitos à base de cimento (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2016). Embora a aderência das fibras de carbono à matriz cimentícia não seja tão boa quanto a da fibra de vidro, o seu emprego como reforço é adequado (PELED et al., 2017).

Um sistema de classificação para as fibras de carbono é baseado no seu módulo de tração. Sob este critério, tem-se fibras de módulos padrão, intermediário, alto e ultra alto. As fibras de carbono são amplamente utilizadas pelas indústrias aeroespacial, automobilística, biomédica, nuclear, entre outras. Devido às excelentes propriedades mecânicas e durabilidade, são materiais promissores para o reforço de matrizes cimentícias.

2.1.2.4 Fibras de vidro álcali-resistente

O vidro é um material de reforço comumente empregado na forma de fibra. Por ser um material facilmente obtível e manufaturável, encontra-se presente na composição de diversos tipos de compósitos. De acordo com Peled et al. (2017), as fibras de vidro são amplamente utilizadas em aplicações de engenharia civil, devido à excelente relação entre o custo de produção e as propriedades mecânicas do material.

De acordo com Hull (1996), as fibras de vidro são produzidas a partir da sílica (SiO_2), por meio da adição de óxido de cálcio, boro, sódio, ferro, alumínio, entre outros. As fibras de vidro se destacam por serem amorfas e isotrópicas, apresentando as mesmas propriedades em todas as direções. Dependendo da composição e dos materiais empregados no processo de fabricação, as fibras de vidro apresentam propriedades e aplicações distintas, conforme

apresentado na Tabela 3. Para uso em compósitos à base de polímeros, destacam-se as fibras de vidro E (*E-glass*), caracterizadas pela alta resistividade elétrica, as fibras de vidro C (*C-glass*), resistentes à agentes químicos, e as fibras de vidro S (*S-glass*), que possuem alta resistência à tração.

<i>Fibra de vidro</i>	<i>Resistência à tração (MPa)</i>	<i>Módulo de elasticidade (GPa)</i>	<i>Deformação última (%)</i>	<i>Densidade (g/cm³)</i>
AR	2500	70	3,6	2,78
C	2758 - 3103	70	-	2,49
E	3500	72,4 - 76	4,8	2,54 - 2,55
S	4600	84 - 88	-	2,48 - 2,49

Tabela 3 – Propriedades de alguns tipos de fibras de vidro (Fonte: Adaptado de PELED et al., 2017)

De acordo com Peled et al. (2017), para uso como reforço em elementos de concreto, as fibras de vidro convencionais apresentam resistência insatisfatória, devido à alcalinidade da matriz cimentícia, que possui pH entre 12,5 e 13,5, sendo necessário o emprego de fibras específicas, como as fibras de vidro álcali-resistentes (*AR-glass fibers*). A resistência alcalina da fibra é obtida com a adição de 15% de óxido de zircônio (ZrO₂) na composição do vidro. Este processo faz com que a perda de resistência da fibra de vidro álcali-resistente seja reduzida para 40%, após 50 anos de vida útil (BÜTTNER; RAUPACH, 2013).

De acordo com Büttner e Raupach (2013), apesar da adição de óxido de zircônio promover melhorias significativas na resistência alcalina das fibras de vidro álcali-resistentes, com o passar do tempo, verifica-se uma redução gradativa dessa resistência, devido ao contato direto com a matriz de cimento.

De acordo com Brescovit (2021), a resistência à tração e à flexão de elementos de concreto têxtil diminuem com o tempo. A partir de ensaios de envelhecimento acelerado em painéis reforçados com têxteis de fibra de vidro álcali-resistentes, verificou-se que a alcalinidade e temperatura provocam perdas consideráveis das propriedades mecânicas, mas que tendem a estabilizar com o tempo. Logo, uma maneira de reduzir essa perda de resistência é criar uma barreira de proteção físico-química, por meio de impregnação com material polimérico.

Outra possibilidade de promover a durabilidade das fibras de vidro álcali-resistentes a longo prazo consiste em promover modificações na composição química das matrizes de cimento, por meio de adições, como escória de alto forno, sílica ativa, cinza volante e metacaulinita.

2.2 MATRIZ CIMENTÍCIA

Nos materiais compósitos, a fase matriz desempenha funções muito importantes. Além de envolver e proteger a fase reforço, mantendo-a na posição correta, a matriz é responsável pela transmissão e distribuição das solicitações externas. Desse modo, a escolha da matriz cimentícia é fundamental para a eficiência e durabilidade do concreto têxtil. Fatores como propriedades mecânicas, consistência adequada para a penetração nos interstícios dos fios, método de produção e compatibilidade química com o reforço são alguns dos principais pontos a serem observados (BRAMESHUBER et al., 2006).

Em relação ao concreto armado, a matriz de concreto têxtil demanda propriedades reológicas especiais e se diferencia quanto à granulometria. Enquanto a matriz de concreto convencional é constituída por agregados graúdos e miúdos, a matriz cimentícia do concreto têxtil possui somente agregados miúdos. Devido a esta característica, as matrizes de concreto têxtil assemelham-se às argamassas, porém, com propriedades mecânicas semelhantes às dos concretos de alta resistência. Logo, são denominadas de concreto de granulometria fina ou concreto fino (BRAMESHUBER et al., 2006; HARTIG, 2011).

De modo geral, o concreto têxtil é produzido com cimentos de alta resistência inicial e baixa relação água/cimento. A fluidez da mistura pode ser obtida com a adição de aditivos (BRESOVIT, 2021). No estado fresco, a matriz cimentícia deve apresentar consistência plástica, boa trabalhabilidade e baixa viscosidade, características essenciais para o completo envolvimento do reforço. No estado endurecido, a matriz deve ter compatibilidade química e boa aderência ao têxtil. Neste sentido, a estabilidade química do têxtil no interior da matriz é essencial (BRAMESHUBER et al., 2006).

Em relação aos requisitos de durabilidade, tanto os aspectos de vida útil do reforço quanto as propriedades mecânicas da matriz, como resistência à flexão e aderência têxtil-matriz, podem ser melhoradas com a adição de materiais poliméricos, como aditivos superplastificantes, e

aditivos minerais, principalmente pozolânicos, como cinza volante, sílica ativa e metacaulinita (PELED et al., 2017; KOUTAS et al., 2019).

Com o intuito de melhorar as características de durabilidade, trabalhabilidade e ligação têxtil-matriz, diversas composições de matrizes cimentícias foram desenvolvidas. Segundo Mechtcherine et al. (2016), para a produção do concreto têxtil, a relação água/cimento varia de 0,3-0,4, com percentual de aglomerante entre 40-50% do volume. A granulometria dos agregados miúdos, geralmente de 1-2 mm, varia de acordo com a distância entre os fios que compõe o reticulado têxtil, o espaçamento entre as camadas de reforço e as dimensões do elemento estrutural. A Tabela 4 apresenta 5 composições de matrizes para concreto têxtil, desenvolvidas no Centro de Pesquisa Colaborativa 528 (*TU Dresden*) e no Centro de Pesquisa Colaborativa 532 (*RWTH Aachen*).

Materiais	Referência	Matrizes cimentícias				
		PZ-0899-01 SFB 532	FA-1200-01 SFB 532	M1 SFB 528	M3 SFB 528	M7 SFB 528
Cimento (c)	kg/m ³	490	210	539	549	839
Tipo de cimento		CEM I 52,5	CEM I 52,5	CEM III/B 32,5	CEM I 32,5 R	CEM I 32,5 R
Cinza volante (cv)	kg/m ³	175	455	243	246	-
Sílica ativa (s)		35	35	-	-	-
Pasta de sílica	a:s = 1:1	-	-	53,9	54,6	-
Mistura	c+cv+s	700	700	809	822	839
Aditivo plastificante	% em massa	1,0-1,5	0,9	2,1-2,2	2,3-2,4	2,1-2,2
Areia de sílica (0-0,125 mm)	kg/m ³	500	470	-	-	-
Areia de sílica (0,2-0,6 mm)	kg/m ³	715	670	-	-	-
Areia (0-1 mm)	kg/m ³	-	-	1079	1092	1189
Água		280	280	242,7	245,6	279,7
Relação água/cimento		0,57	1,33	0,45	0,45	0,33
Relação água/cimento = água/(c+cv+s)		0,4	0,4	0,3	0,3	0,33

Tabela 4 – Composições de matrizes para concreto têxtil (Fonte: Adaptado de MECHTCHERINE et al., 2016)

De acordo com Mechtcherine et al. (2016), as composições PZ-0899-01 e FA-1200-01 atendem à alta produtividade requerida pela pré-fabricação de elementos de parede fina, devido à baixa viscosidade e à capacidade autonivelante das misturas, características necessárias para o envolvimento completo das camadas têxteis.

As matrizes M1, M3 e M7, por sua vez, são recomendadas para a aplicação pulverizada do concreto têxtil em reforços ou reparos de tetos, de superfícies verticais e/ou inclinadas ou de geometrias complexas, devida à estabilidade alta e à boa adesão ao substrato. Logo, verifica-se que a matriz deve ser projetada para atender aos diferentes projetos e as aplicações requerem, portanto, composições de misturas especiais. Na Tabela 5, verifica-se algumas das principais propriedades das matrizes cimentícias de concreto têxtil no estado endurecido.

<i>Materiais</i>	<i>Referência</i>	<i>Matrizes cimentícias</i>				
		<i>PZ-0899-SFB 532</i>	<i>FA-1200-SFB 532</i>	<i>M1 SFB 528</i>	<i>M3 SFB 528</i>	<i>M7 SFB 528</i>
Resistência à compressão aos 28 dias	MPa	74	32	53,7	63,5	72,3
Resistência à flexão aos 28 dias	MPa	7,6	5,1	7,5	8,6	11,2
Módulo de Young	GPa	33	24,8	21	25,5	30,8
Retração aos 28 dias	mm/m	0,81	0,56	0,2	0,83	0,53
Retração aos 360 dias	mm/m	1,01	-	0,85	1,27	-

Tabela 5 – Propriedades básicas de matrizes de concreto têxtil endurecidas (Fonte: Adaptado de MECHTCHERINE et al., 2016)

2.3 COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO TÊXTIL

A resistência mecânica é um dos principais parâmetros utilizados para a caracterização de materiais cimentícios. Apesar de resistência elevada à compressão, as matrizes de cimento apresentam comportamento frágil, quando submetidas aos esforços de tração. Tal propriedade é caracterizada pela rápida propagação de fissuras.

Nos materiais frágeis, as fissuras funcionam como uma barreira à propagação de tensões. Quando uma fissura se forma, há a diminuição da área de suporte de carga, fazendo com que as tensões passem a se concentrar em sua extremidade. Quando o valor da tensão solicitante é superior à tensão crítica da matriz, ocorre a ruptura, geralmente de forma abrupta (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Segundo Naaman (2003), o comportamento dos compósitos reforçados com fibras submetidos à tração pode ser caracterizado como amolecimento por deformação (*strain-softening*), quando há uma perda progressiva da capacidade resistente após a ruptura da matriz, e endurecimento por deformação (*strain-hardening*), quando o compósito apresenta aumento da capacidade resistente após a ruptura da matriz.

O comportamento *strain-softening* relaciona-se à abertura de uma fissura localizada, enquanto o comportamento *strain-hardening* está associado à formação de múltiplas fissuras e a obtenção da máxima tensão pós-fissuração. Este, por sua vez, com o avanço do processo de fissuração, apresenta comportamento *strain-softening*, conforme pode ser visto na Figura 17.

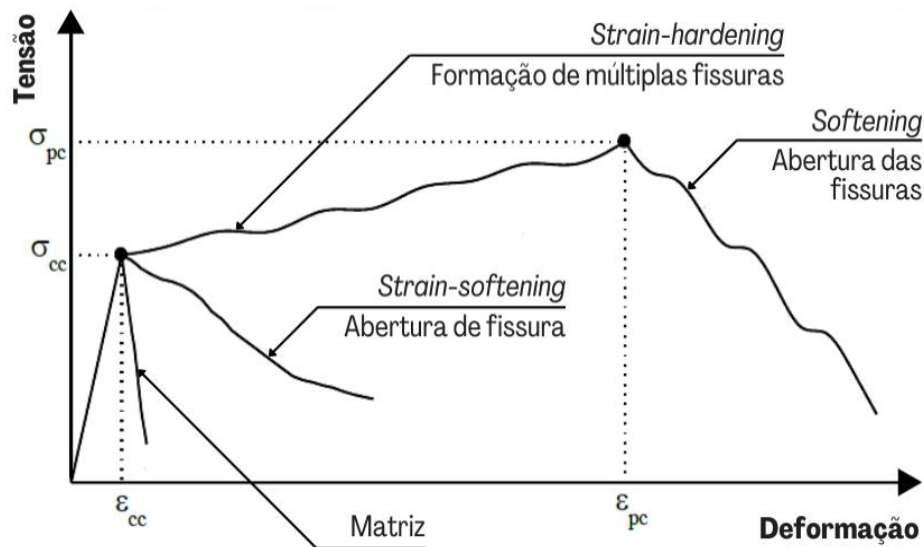


Figura 17 – Curva característica do comportamento mecânico de concretos reforçados com fibras submetidos à tração (Fonte: Adaptado de NAAMAN; REINHARDT, 2006)

Quanto aos esforços de flexão, o comportamento dos compósitos reforçados com fibras pode ser caracterizado como amolecimento por deflexão (*deflection-softening*), quando a carga resistida diminui após a ruptura da matriz, e endurecimento por deflexão (*deflection-hardening*), quando a carga resistida pelo compósito é maior que a carga necessária para a ruptura da matriz. Este é caracterizado pela formação de múltiplas fissuras, atingindo a carga máxima pós-fissuração. Com o avanço da abertura das fissuras, o compósito apresenta o comportamento *deflection-softening*, como apresentado na Figura 18.

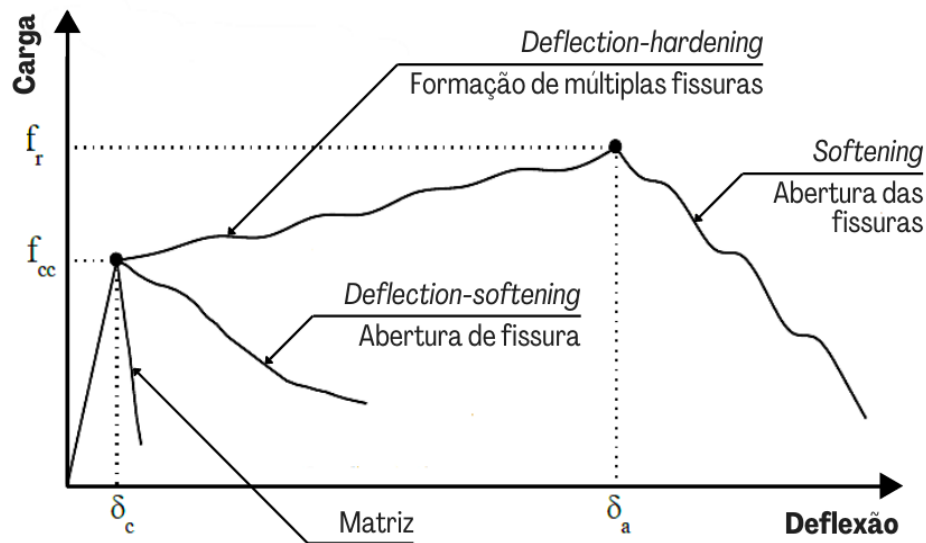


Figura 18 – Curva característica do comportamento mecânico de concretos reforçados com fibras submetidos à flexão (Fonte: Adaptado de NAAMAN; REINHARDT, 2006)

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), quando a fração volumétrica de fibras na matriz é inferior a 1%, a contribuição do reforço relaciona-se à redução do processo de fissuração, devido à retração. Quando a fração volumétrica de fibras é de 1% a 2%, há contribuições de resistência ao impacto e à fadiga. Em ambos os casos, o compósito apresenta comportamento *strain-softening*, na tração, e *deflection-softening*, na flexão. A curva tensão-deformação é descendente após a fissuração da matriz.

Em compósitos com frações volumétricas de fibras acima de 2%, verifica-se comportamento *strain-hardening*, na tração, e *deflection-hardening*, na flexão. Em ambos os casos, as fibras contribuem para o aumento da resistência do compósito, de modo que possam ser utilizados para fins estruturais. A curva tensão-deformação é ascendente após a fissuração da matriz (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

De modo geral, quando submetidos à tração, a maior parte dos concretos reforçados com fibras apresenta diminuição progressiva na tensão, tão logo manifestada a primeira fissura. No entanto, alguns concretos reforçados, com maiores teores de fibras, exibem o comportamento de endurecimento por deflexão. Para aplicações estruturais, este tipo particular de concreto é desejável (WIGHT; MACGREGOR, 2012).

De acordo com Peled e Mobasher (2005), o concreto têxtil apresenta comportamento *strain-hardening*, alcançando valores de resistência à tração, capacidade de carga e tenacidade

superiores àqueles comumente obtidos em compósitos reforçados com fibras alinhadas ou aleatoriamente distribuídas.

Segundo Hegger et al. (2006), o comportamento *strain-hardening* do concreto têxtil pode ser caracterizado por meio de ensaios de tração e flexão. Apesar dos ensaios de flexão serem mais fáceis de realizar, os resultados dos ensaios de tração fornecem informações mais detalhadas sobre o comportamento do material. Quando solicitado à tração uniaxial, o concreto têxtil apresenta comportamento dúctil, como apresentado na Figura 19.

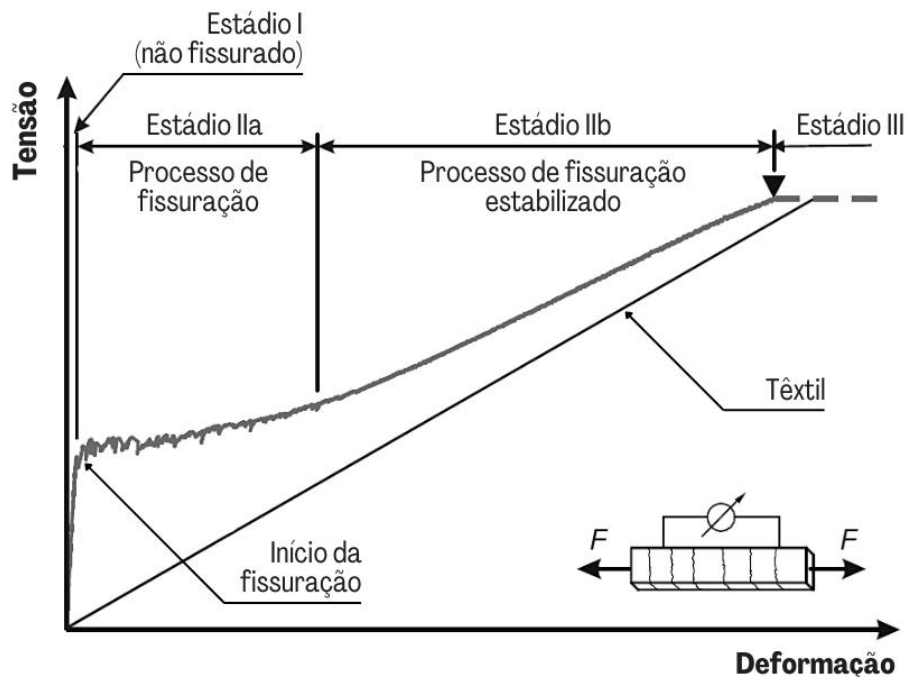


Figura 19 – Diagrama tensão-deformação do concreto têxtil sob tração uniaxial (Fonte: Adaptado de HEGGER et al., 2006)

Portanto, o comportamento *strain-hardening* de um elemento de concreto têxtil, quando submetido à tração uniaxial, pode ser caracterizado em 3 estádios de deformação. Na fase elástica, ou estágio I, a matriz cimentícia suporta os esforços de tração sem fissurar, e a rigidez do compósito corresponde, aproximadamente, ao módulo de elasticidade da matriz. Quando o esforço solicitante aumenta, e se torna superior à resistência à tração da matriz, ocorre o início da fissuração, caracterizado pela formação da primeira fissura. Nesse instante, tem-se início o estágio IIa, caracterizado pela ativação do reforço e pela múltipla fissuração da matriz (HEGGER et al., 2006).

No estágio IIa, são as boas condições de aderência na interface têxtil-matriz que permitem a transferência uniforme dos esforços, sendo identificadas pela abertura de novas fissuras. Esse processo ocorre, sucessivamente, até que as fissuras se estabilizem e o acréscimo de tensão passe a ser absorvido somente pelo têxtil. Quando não há formação de novas fissuras, inicia-se o estágio IIb, caracterizado pela abertura das fissuras.

No estágio IIb, o trecho da curva tensão-deformação do compósito assemelha-se à curva tensão-deformação do reforço. Por fim, quando o têxtil atinge sua resistência última, ocorre a ruptura do concreto têxtil, caracterizando o estágio III. Visto que os reforços têxteis são materiais frágeis, o concreto têxtil apresentará uma ruptura frágil (HEGGER et al., 2006; PELED et al., 2017).

2.3.1 Interfaces filamento-filamento e têxtil-matriz

De acordo com Bentur e Mindess (2007), os compósitos cimentícios se caracterizam por apresentarem uma zona de transição interfacial (ZTI) próxima ao reforço. Nesta região, a microestrutura da matriz é consideravelmente diferente das regiões mais distantes do reforço. A natureza e o tamanho da zona de transição interfacial dependem do tipo de reforço e da tecnologia de produção do compósito. Logo, as características das interfaces filamento-filamento e têxtil-matriz exercem influência fundamental no desempenho do concreto têxtil.

Devido à estrutura dos fios ser composta por centenas ou até milhares de filamentos, existem interstícios tão pequenos, da ordem de micrómetros (μm), na interface filamento-filamento, que os materiais provenientes da matriz de cimento não conseguem penetrar. Como resultado, a microestrutura da ZTI apresenta pequenos vazios. Tal característica faz com que os filamentos possuam certa capacidade de movimento (BENTUR; MINDESS, 2007).

Com auxílio de microscopia óptica, verifica-se que a aderência têxtil-matriz não é uniforme, uma vez que apenas os filamentos externos, também chamados de filamentos de borda, encontram-se ancorados à matriz, enquanto os filamentos internos, ou filamentos do núcleo, podem deslizar facilmente, como mostrado na Figura 20.

Deste modo, diz-se que a aderência interna (interface filamento-filamento) é menor que a aderência externa (têxtil-matriz), pois apenas o atrito entre os filamentos pode gerar certa resistência de união (REINHARDT et al., 2006). Quando a matriz é solicitada até a ruptura, a distribuição de tensões nos filamentos também não é uniforme. De acordo com Kulas (2015),

cerca de apenas 30 a 35% dos filamentos são ativados. Na Figura 21, é apresentada a vista ampliada de um fio têxtil, formado pela união de 100 filamentos de 14 μm de diâmetro, e a representação esquemática da transferência de tensões entre os filamentos de borda e de núcleo.

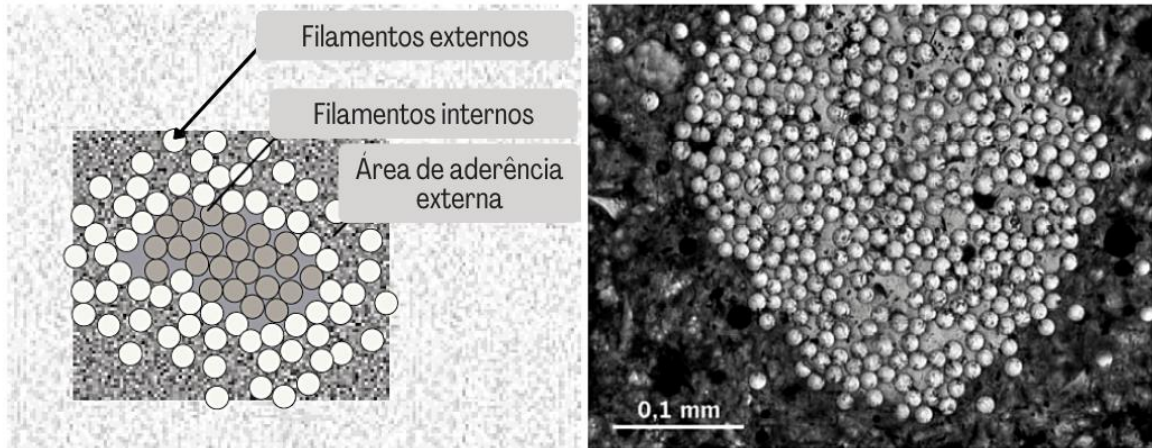


Figura 20 – Representação esquemática (à esquerda) e vista ampliada (à direita) de um fio têxtil não impregnado pela matriz de cimento (Fonte: Adaptado de REINHARDT et al., 2006)

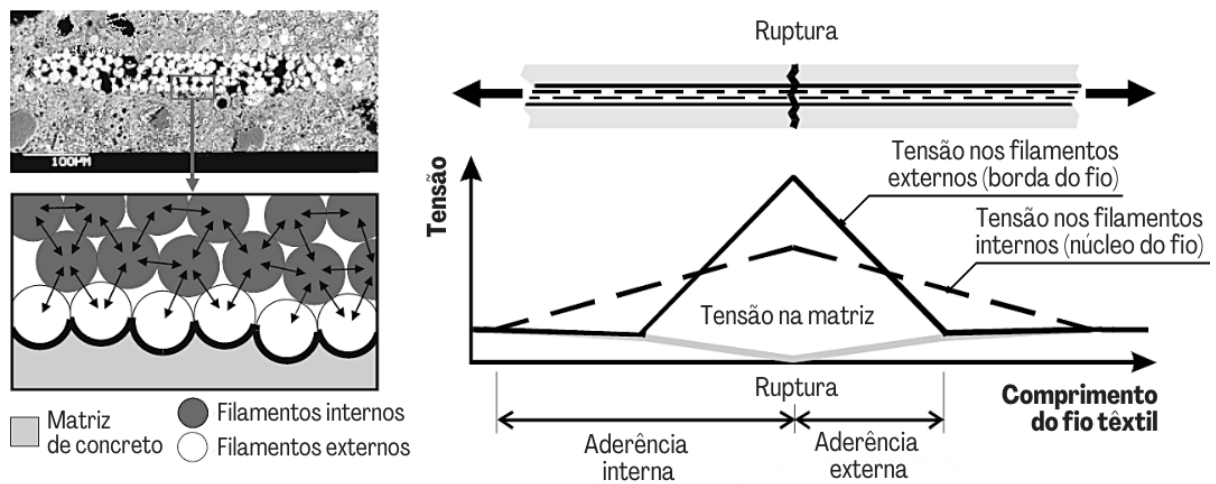


Figura 21 – Vista ampliada de um fio têxtil (à esquerda), e a representação esquemática da transferência de tensões entre os filamentos de borda e de núcleo (à direita) (Fonte: Adaptado de REINHARDT et al., 2006)

2.3.2 Tratamento do têxtil por impregnação

De acordo com Reinhardt et al. (2006), a qualidade da ligação entre os filamentos pode ser melhorada por meio de impregnação. Segundo Kulas (2013), os têxteis não impregnados apresentam uma resistência de ligação inferior na interface têxtil-matriz, quando comparados aos impregnados. Devido às demandas de durabilidade, processabilidade e capacidade de carga, os reforços têxteis impregnados com polímero estão cada vez mais sendo usados (BÜTTNER, 2012). Materiais impregnantes que apresentam bons resultados são as resinas a base de epóxi e estireno-butadieno (SBR) (KULAS, 2015).

De modo geral, a impregnação consiste na saturação dos interstícios dos fios têxteis com material polimérico. Suas funções principais são: promover a união entre os filamentos, internos e externos, e homogeneizar a seção transversal dos fios, de modo a permitir uma transferência mais uniforme das solicitações.

Em virtude do seu caráter polar, a aplicação de resina epóxi é uma das principais soluções empregadas para promover o aumento de aderência nas interfaces filamento-filamento por meio de impregnação. De acordo com Beber (2003), as resinas epoxídicas representam uma classe importante dos polímeros termorrígidos ou termoendurecíveis, que são aqueles que, quando curados, transformam-se em materiais infusíveis e insolúveis, de estrutura molecular tridimensional complexa. Comercialmente, são encontradas em formulações bicomponentes, constituídas por um agente principal, denominado resina, e um agente endurecedor, chamado catalisador. Ambos os materiais devem ser misturados momentos antes do processo de aplicação. Este, por sua vez, deve ser realizado de acordo com o tempo de utilização indicado pela empresa fabricante, pois uma vez excedido esse período, a resina não pode mais ser trabalhada sem esforço.

Além de apresentarem excelente aderência a diversos tipos de fibra, matrizes e substratos, as resinas epoxídicas são quimicamente resistentes e apresentam baixa retração durante o processo de cura. Esta, por sua vez, pode ser feita à temperatura ambiente ou acelerada, por meio de elevação da temperatura. O tempo de endurecimento pode ser influenciado pela temperatura do ambiente e do concreto.

De acordo com Raupach et al. (2006), a substância impregnante possui partículas menores que as da matriz de cimento e, por este motivo, conseguem penetrar no interior dos fios e

promover a união entre os filamentos. Como resultado, obtém-se um material compósito, constituído de filamentos e resina, como apresentado na Figura 22.

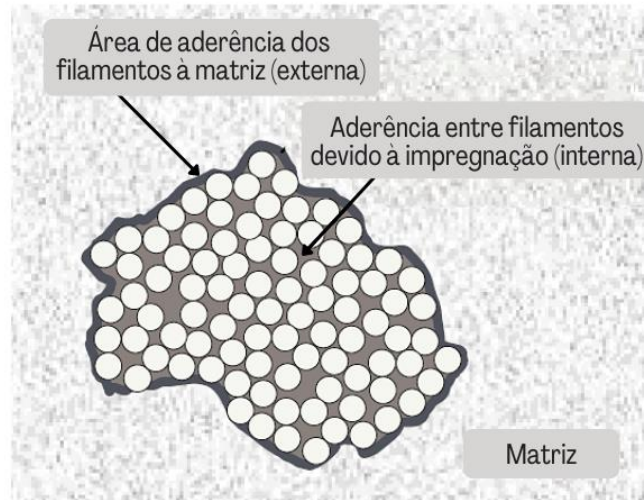


Figura 22 – Representação da aderência de um fio têxtil impregnado (Fonte: Adaptado de REINHARDT et al., 2006)

Com o fio impregnado, os filamentos internos perdem a liberdade de movimento, e passam a trabalhar em conjunto com os filamentos externos. Logo, verifica-se que a aderência interna (interface filamento-filamento) é maior que a aderência externa (têxtil-matriz), uma vez que todos os filamentos se encontram ancorados. A Figura 23 mostra o efeito da impregnação na distribuição de tensões entre os filamentos, que passam a ser transferidas de forma mais homogênea, o que leva a uma maior capacidade de carga (GRIES, et al., 2016).

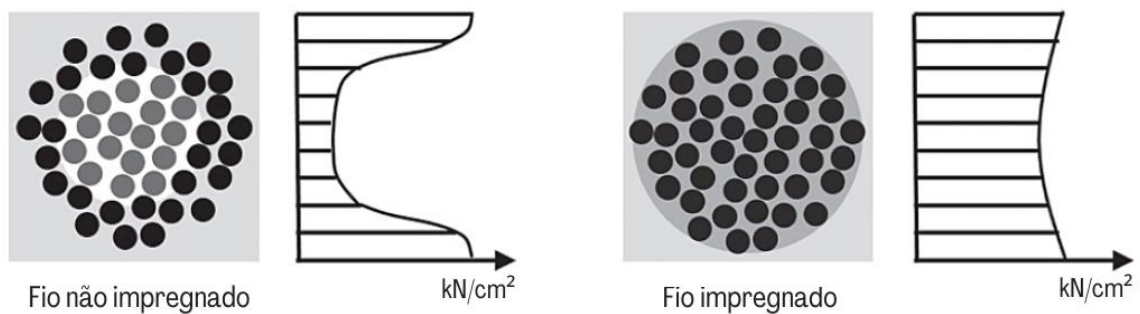


Figura 23 – Representação da transferência de esforços no fio têxtil impregnado e no não impregnado (Fonte: Adaptado de GRIES et al., 2016)

Assim, tanto o comportamento do fio têxtil impregnado quanto o do fio não impregnado podem ser representados por um diagrama de tensão-deslizamento, ilustrado na Figura 24, onde a curva A apresenta o comportamento do fio têxtil impregnado, e a curva B mostra o comportamento do fio sem impregnação (REINHARDT et al., 2006).

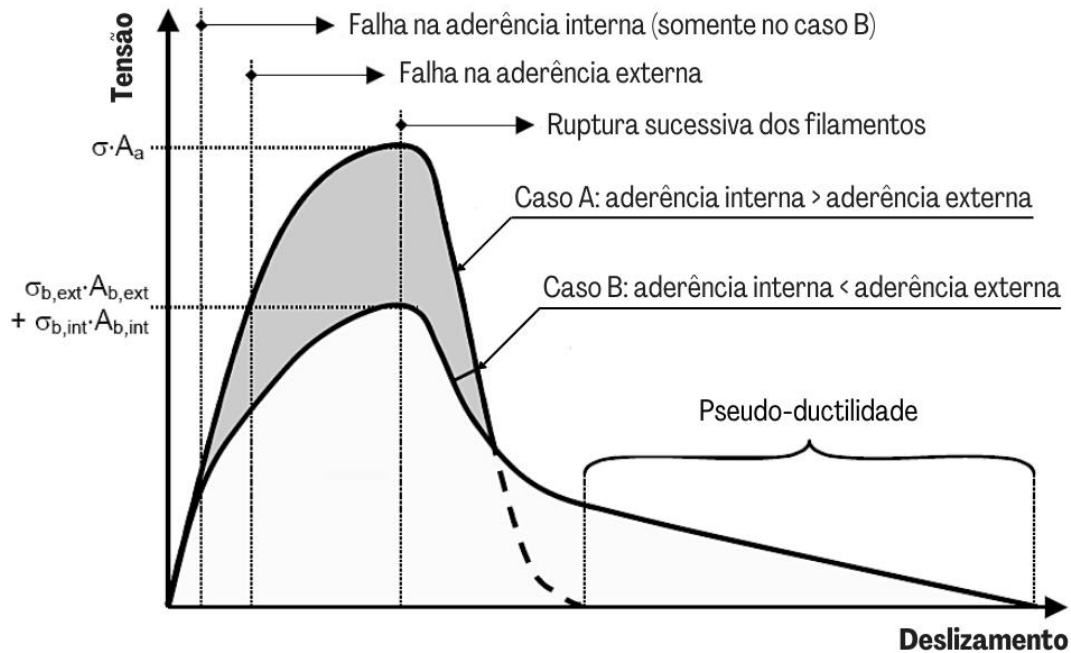


Figura 24 – Curva tensão-deslizamento do fio têxtil impregnado e do não impregnado (Fonte: Adaptado de REINHARDT et al., 2006)

De modo geral, a ligação na interface têxtil-matriz determina a resistência e ductilidade do compósito. Um material dúctil pode ser obtido caso a aderência têxtil-matriz seja fraca, porém se a ligação é forte, tem-se um material resistente e frágil (REINHARDT et al., 2006).

Na curva do caso A, em que a aderência interna é maior que a aderência externa, o fio têxtil impregnado apresenta uma resistência muito superior à do fio não impregnado, contudo, logo após a tensão máxima ser atingida, há uma queda abrupta na curva tensão-deslizamento, típica de um material frágil. Isso ocorre porque os filamentos rompem quase simultaneamente.

Na curva do caso B, em que a aderência interna é menor que a aderência externa, o fio têxtil não se encontra impregnado, apresentando uma resistência mais baixa. Segundo Donnini et al. (2016), a matriz inorgânica de cimento não oferece as mesmas propriedades adesivas de uma resina epóxi, por exemplo, e, portanto, a ligação entre o têxtil e a matriz não é tão forte. Neste caso, observa-se um comportamento mais dúctil do material, atribuído ao deslizamento e à ruptura sucessiva dos filamentos dentro da matriz.

A aderência têxtil-matriz pode ser afetada por diversos fatores, como condição da matriz (fissurada ou não fissurada), composição química da matriz, tipo de fibra, geometria do têxtil, orientação do reforço, características da interface de ligação, rigidez do reforço em relação à matriz, presença de fibras curtas, entre outros. De acordo com Reinhardt et al. (2006), o caso A se assemelha ao comportamento das barras lisas de aço, mas só é válido para fios completamente impregnados por resina e sem imperfeições locais. Esta tendência, contudo, não pode ser esperada se a superfície do têxtil apresentar irregularidades que interfiram no comportamento mecânico do material.

Quando empregada nas fibras de vidro álcali-resistentes, a técnica de impregnação cria uma película protetora, que faz com que a perda de resistência do reforço à alcalinidade da matriz cimentícia seja novamente reduzida. Segundo Büttner (2012) e Kulas (2013), a perda de resistência das fibras de vidro AR pode ser reduzida em até 50% com o processo de impregnação. Ao mesmo tempo, a capacidade de carga do têxtil impregnado aumenta de 2 a 3 vezes em relação ao têxtil não impregnado.

Kulas (2015) ressalta a importância da utilização de têxteis impregnados com resinas, a fim de aumentar a ligação entre os filamentos. De acordo com Jesse et al. (2010), a técnica de impregnação deve ser integrada à tecnologia de fabricação dos fios. Logo, por intermédio de controle de qualidade, pode-se garantir propriedades mais uniformes para o reforço.

Quanto à impregnação de resina epóxi, Dvorkin et al. (2016) identificaram, a partir de ensaios de tração direta em concretos têxteis de fibra de carbono, o efeito de deslizamento na interface têxtil-matriz. De acordo com os autores, apesar da técnica de impregnação promover o aumento da capacidade resistente, ambas as variáveis da pesquisa resultaram em compósitos de comportamento *strain-softening*.

2.3.3 Tratamento do têxtil por revestimento

O revestimento do têxtil ou *coating* consiste em técnicas de tratamento superficial do reforço com o objetivo de melhorar a sua aderência à matriz. A aplicação combinada de resina epoxídica seguida de areia de sílica ou de quartzo é uma técnica de revestimento superficial do têxtil encontrada na literatura. Nesse sentido, é importante ressaltar que a técnica de revestimento se diferencia do processo impregnativo, uma vez que ocorre posteriormente ao processo de fabricação do têxtil. Atualmente, o revestimento do têxtil pode ser considerado um método de tratamento adicional para têxteis impregnados ou não impregnados.

A partir de uma pesquisa experimental, Qinghua e Shilang (2011) estudaram o revestimento de têxteis de fibra de carbono com resina epóxi e diferentes tamanhos de grãos de areia (0,15-0,3 mm, 0,3-0,6 mm, 0,6-122 mm). Com a abordagem proposta, os autores verificaram que a técnica de tratamento superficial pode aumentar a resistência mecânica da união na interface têxtil-matriz, devido ao aumento da rugosidade superficial introduzida pela areia.

Entre outras variáveis de estudo, Shiping et al. (2013) também investigaram a presença de areia e resina epóxi como tratamento superficial de reforços têxteis em placas finas de concreto têxtil. De acordo com os resultados da pesquisa, a presença de areia não influencia no valor da carga de fissuração do componente, mas reduz o deslizamento do têxtil no interior da matriz, fazendo com que as forças entre os constituintes sejam transferidas de forma mais eficaz. Além disso, a areia retarda o processo de formação e abertura de fissuras, melhorando a capacidade de carga. No entanto, a forte resistência de união pode levar à fratura abrupta e simultânea dos filamentos que compõem o reticulado têxtil, caracterizando uma ruptura frágil.

Doninni et al. (2016) investigaram o comportamento de ligação na interface têxtil-matriz em concretos têxteis de fibra de carbono com e sem revestimento de resina epóxi e areia de quartzo. Para o programa experimental, utilizaram-se 3 tipos de argamassa à base de cimento e diferentes níveis de *coating*. Quanto aos resultados da pesquisa, verificou-se que os concretos têxteis não revestidos apresentaram comportamento *strain-softening*, e os concretos têxteis revestidos apresentaram comportamento *strain-hardening*. Com os ensaios de tração direta, constatou-se que o efeito de deslizamento pode ser evitado com a aplicação de areia sobre a camada de material polimérico. Concluiu-se que a adição da camada de areia promove a ancoragem mecânica na interface têxtil-matriz, potencializando o desempenho mecânico do compósito.

Para melhorar o desempenho da ligação na interface têxtil-matriz, Donnini e Corinaldesi (2017) empregaram esta técnica de revestimento em elementos cimentícios reforçados com têxteis de diferentes tipos de fibra (carbono, basalto e PBO). Os resultados dos ensaios de tração confirmaram que a combinação da resina epóxi fresca com areia de sílica aumentou a resistência à tração última e a rigidez na fase fissurada do compósito, mantendo, ainda, certo nível de pseudo-ductilidade.

Em linha de pensamento semelhante, Jo et al. (2022) investigaram experimentalmente o desempenho de compósitos cimentícios têxteis, em ensaios de tração e flexão, e de vigas de

concreto armado, reforçadas à flexão. As variáveis da pesquisa envolveram o método de produção do têxtil, por tecelagem (com estrutura do tipo leno) e por tricotagem (com ponto de costura do tipo pilar), tipo de material impregnante (SBR ou epóxi), e a presença de revestimento de pó de alumínio. Nos testes de tração direta, Jo et al. (2022) observaram que o têxtil com ponto do tipo pilar e impregnado com epóxi apresentou os melhores resultados, enquanto os têxteis com ponto do tipo pilar e impregnado com SBR e o têxtil do tipo leno e impregnado com epóxi apresentaram, respectivamente, 50% e 75% da carga máxima resistida pelo têxtil de desempenho mais elevado, porém, quando revestidos com pó de alumínio, as resistências à tração desses compósitos aumentaram, atingindo o mesmo nível. Quanto aos ensaios de flexão das vigas reforçadas, os elementos sem a presença do revestimento de pó de alumínio falharam devido ao deslizamento do reforço no interior da matriz, enquanto os elementos revestidos com pó de alumínio falharam devido ao descolamento da interface matriz-substrato, causado por trincas intermediárias.

2.3.4 Métodos de produção do concreto têxtil

Quando novos materiais de construção são desenvolvidos, o estudo dos diferentes métodos de produção e/ou fabricação é fundamental. A partir da análise das características, propriedades e potencialidades dos produtos resultantes, pode-se identificar os aspectos positivos e negativos, assim como as limitações de cada técnica, a fim de se obter um material de qualidade superior e com relação custo-benefício otimizada. Em vista disso, verifica-se que há, na literatura, diferentes métodos de produção do concreto têxtil, cabendo ao responsável técnico definir o método mais adequado para cada caso. De acordo com Brameshuber (2016), as técnicas mais utilizadas são moldagem, laminação e pulverização.

2.3.4.1 Moldagem

Na moldagem, ou *casting*, o reforço têxtil pode estar fixo na fôrma ou ser inserido de forma livre durante a concretagem. Para facilitar o lançamento e a penetrabilidade entre as camadas têxteis, o concreto de granulometria fina deve apresentar consistência fluida e ser lançado em uma única etapa. Podem ser empregados têxteis bidimensionais, combinados com espaçadores, ou têxteis tridimensionais. O processo de moldagem está ilustrado na Figura 25 (BRAMESHUBER, 2016).

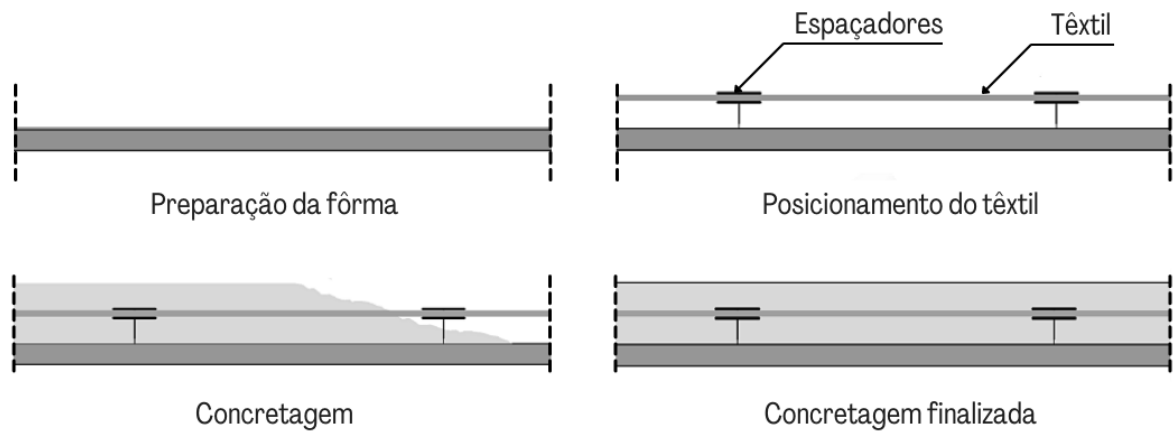


Figura 25 – Moldagem na posição horizontal (Fonte: Adaptado de KULAS, 2015)

Brameshuber (2016) destaca que a técnica de moldagem apresenta algumas limitações quanto à disposição do reforço. Quanto à disposição horizontal, se a configuração da armadura têxtil for muito densa, ou seja, com camadas de reforço muito próximas, o concreto pode não conseguir penetrar, mesmo se uma alta energia de compactação for aplicada. Quanto à produção na posição vertical, se o reforço não apresentar rigidez suficiente, não é possível assegurar que o têxtil permaneça estável durante a concretagem, devido à pressão exercida pelo concreto. O processo de produção vertical por moldagem está ilustrado na Figura 26.

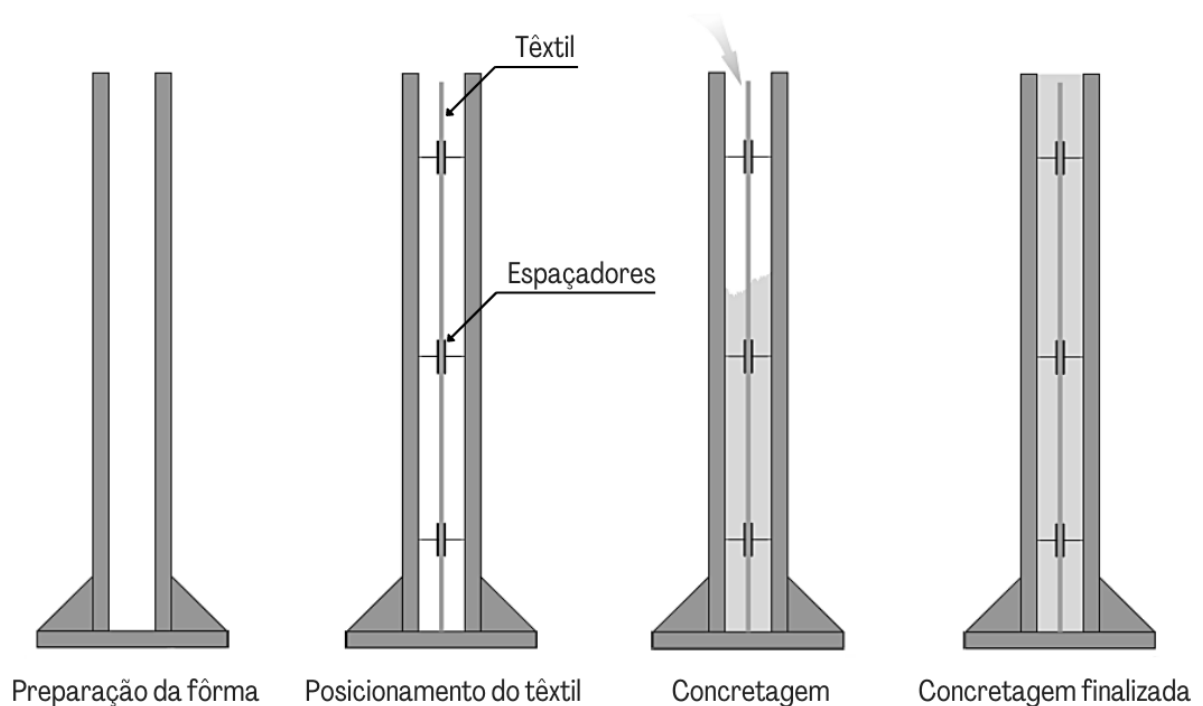


Figura 26 – Moldagem na posição vertical (Fonte: Adaptado de KULAS, 2015)

2.3.4.2 Laminação

Na técnica de laminação, ou *laminating*, o têxtil e o concreto de granulometria fina são inseridos em camadas de forma alternada, até que a espessura prevista em projeto seja alcançada (SCHEERER et al., 2015). Neste processo, as etapas de produção compreendem o lançamento do concreto, a compactação da camada com uso de rolo e a disposição manual do têxtil, conforme pode ser visto na Figura 27. Quanto à geometria do reforço, verifica-se que esta técnica é adequada para têxteis bidimensionais e planos (BRAMESHUBER, 2016).

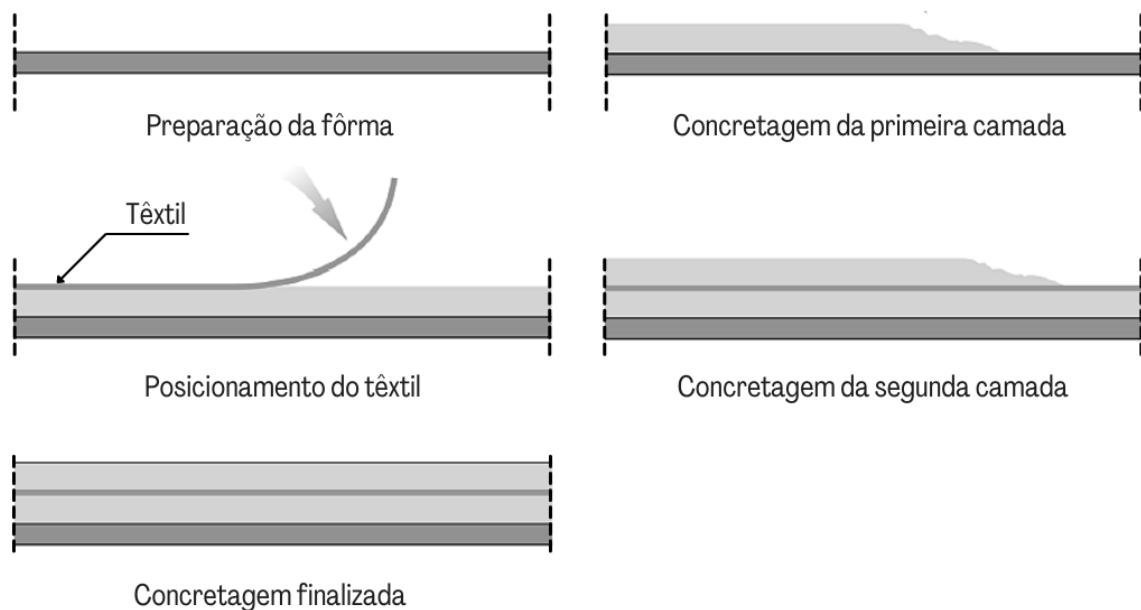


Figura 27 – Laminação (Fonte: Adaptado de KULAS, 2015)

Em relação à moldagem, a matriz do método de laminação pode apresentar consistência fluida ou rígida. No entanto, com alta fluidez, o concreto pode ser facilmente distribuído na fôrma, de modo que os fios têxteis sejam totalmente envolvidos pela matriz. Neste sentido, verifica-se que o uso de rolo contribui para a penetrabilidade do concreto no têxtil, fator que melhora a aderência têxtil-matriz no estado endurecido (BRAMESHUBER, 2016).

2.3.4.3 Pulverização

A técnica de pulverização, também chamada de projeção ou *spraying/shotcreting*, consiste no lançamento do concreto por meio de equipamentos de baixa pressão (de até 8 bar), semelhantes àqueles empregados na projeção de gesso. Assim como na laminação, o processo de pulverização consiste na produção do concreto têxtil em camadas e com auxílio de rolo. Os

requisitos de geometria do reforço também são os mesmos: têxteis bidimensionais e planos (BRAMESHUBER, 2016).

Quanto à consistência da matriz de cimento, a técnica de pulverização requer uma mistura bombeável e pulverizável. Geralmente, quando utilizada para a concretagem de superfícies verticais, a composição do concreto de granulometria fina deve apresentar maior viscosidade e aderência. Para a produção de elementos horizontais, o método pode ser aplicado como alternativa aos métodos de moldagem e laminação. A vantagem da pulverização é a velocidade de produção, uma vez que vários metros quadrados podem ser concretados em pouco tempo (BRAMESHUBER, 2016).

2.4 CONCRETO TÊXTIL PARA O REFORÇO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

Na engenharia civil, o concreto armado é o principal compósito utilizado para aplicações estruturais. A combinação da alta resistência à compressão do concreto e da alta resistência à tração do aço proporciona uma capacidade de carga adequada para muitas aplicações na indústria da construção.

A matriz de concreto, por ser altamente alcalina, passiva o aço, protegendo-o. Entretanto, substâncias agressivas, como dióxido de carbono, podem penetrar através dos poros do concreto e reduzir a alcalinidade da matriz. Este processo, também conhecido como carbonatação, se inicia na superfície do concreto e segue em direção às regiões internas, causando a despassivação da armadura. Assim, o reforço de aço perde parte de sua proteção e começa a corroer. Em casos extremos, a corrosão provoca o deslocamento do concreto próximo às armaduras, reduzindo a durabilidade da estrutura e levando à possíveis falhas estruturais (KULAS, 2015).

A deterioração das estruturas de concreto armado pode apresentar causas diversas, devido a um conjunto complexo de fatores. No entanto, com exceção dos casos relacionados à ocorrência imprevisível de desastres naturais, as manifestações patológicas têm suas origens motivadas por falhas que podem ocorrer em uma ou mais atividades inerentes às etapas básicas de projeto, execução e utilização da construção. Giese (2019) complementa que os sintomas patológicos podem surgir de maneira pontual e isolada, porém, a evolução do

problema e a sinergia dos efeitos deletérios podem comprometer a durabilidade, segurança e estabilidade da estrutura.

Nesse sentido, as estruturas de concreto armado que não forem bem projetadas e construídas, ou apresentarem alteração de uso, má utilização e manutenção inadequada, certamente irão se deteriorar de modo prematuro, exigindo intervenção para serem mantidas em condições de uso. Visto por este prisma, uma estrutura que apresente desempenho insatisfatório não, necessariamente, está condenada, uma vez que existem soluções técnicas que objetivam a recuperação do desempenho seguro de suas funções.

Assim, com a finalidade de melhorar a durabilidade e de ampliar a vida útil das estruturas de concreto armado, as soluções técnicas buscam eliminar as manifestações patológicas existentes e, quando necessário, recuperar e/ou reforçar a capacidade de suporte original perdida, de modo a torná-las aptas novamente a exercerem suas funções com segurança (GIESE, 2019).

De modo geral, as intervenções estruturais implicam no emprego de elementos adicionais que vão complementar a capacidade resistente da estrutura deteriorada. Neste sentido, devido às ótimas propriedades mecânicas e a resistência à corrosão, Peled et al. (2017) destacam a eficiência do concreto têxtil para reforço de estruturas de concreto armado. Desse modo, tem-se a união entre diferentes materiais compósitos, cujo comportamento deve-se à ação combinada e sucessiva dos reforços da matriz (concreto têxtil) e do substrato (viga de concreto armado).

2.4.1 Pesquisas e aplicações para o reforço de vigas

O número de pesquisas sobre concreto têxtil cresceu vertiginosamente nos últimos anos, com resultados melhorados, devido à evolução tecnológica dos métodos de fabricação dos reforços têxteis. À vista disso, verifica-se o grande potencial do material, tanto como solução para a produção de novos elementos estruturais quanto para reforço e reparo de estruturas existentes.

Por outro lado, de acordo com Larrinaga et al. (2022), poucos estudos buscam avaliar o comportamento do concreto têxtil como solução para o reforço de estruturas de concreto armado de baixa qualidade, geralmente verificado em estruturas antigas e deterioradas. Posto isso, Larrinaga et al. (2022) estudaram, numericamente e experimentalmente, o efeito da aplicação do concreto têxtil em estruturas com idade entre 60 e 100 anos. Utilizando

diferentes tipos de fibras (basalto, carbono e aço), os autores realizaram ensaios de flexão em 16 vigas de concreto armado de resistência à compressão inferior a 17 MPa e com armaduras de 5,0 mm de diâmetro. Ao final dos ensaios, verificou-se que todas as vigas reforçadas com concreto têxtil aumentaram rigidez, capacidade de carga e ductilidade, sendo que, dependendo do tipo de têxtil e da configuração do reforço, o momento fletor máximo aumentou entre 30% e 200% em relação às vigas de referência. Além disso, o mecanismo de ruptura por descolamento prematuro do reforço foi efetivamente combatido com ancoragens em forma de U. Verificou-se, também, que os resultados experimentais apresentaram concordância com a abordagem numérica.

Para analisar o comportamento de vigas de concreto armado reforçadas à flexão com concreto têxtil de fibra de basalto, Elsanadedy et al. (2013) investigaram o desempenho de matrizes constituídas de argamassa de cimento comum e de argamassa polimérica. A partir de ensaios experimentais, verificou-se que a matriz de argamassa modificada com polímero apresentou melhor aderência ao têxtil e ao substrato de concreto, ocasionando aumento de até 91% na capacidade de flexão das vigas reforçadas. Nos testes em corpos de prova, verificou-se que a argamassa de cimento comum falhou por descolamento do reforço enquanto a argamassa polimérica falhou por ruptura do têxtil. Os ganhos na capacidade de carga dos corpos de prova foram de 82% e 91%, respectivamente, em relação ao corpo de prova não reforçado. Deste modo, os autores concluíram que a argamassa modificada com polímero proporcionou melhor aderência entre as camadas de concreto têxtil e ao substrato de concreto e, conseqüentemente, melhorou a ductilidade da viga, em comparação com a argamassas de cimento comum.

Para avaliar a eficiência do concreto têxtil, Ombres (2011) realizou ensaios de flexão a quatro pontos em 12 vigas de concreto armado reforçadas com fibras de poliparafenileno benzobisoxazol (PBO) e verificou aumento da capacidade resistente de 10 a 44% em comparação às vigas não reforçadas. Para as vigas que romperam por flexão, verificou-se aumento da ductilidade, em oposição às vigas que romperam por descolamento da camada de reforço, que apresentaram uma diminuição da ductilidade, quando comparadas com as vigas não reforçadas.

No Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Reginato (2020) avaliou experimentalmente a recuperação e a reabilitação de vigas de concreto armado induzidas à corrosão pelo método da Corrosão Acelerada por Imersão

Modificada (CAIM) em três níveis de perda de massa: 5%, 10% e 15%. A fim de se obter um comportamento representativo, o autor utilizou-se de elementos estruturais em escala real, com 15 cm de base, 30 cm de altura e 300 cm de comprimento. Para a reabilitação, foram empregados concreto de ultra alto desempenho reforçados com fibras (UHPRFC) e concreto têxtil. No comportamento estrutural à flexão, observou-se uma redução de 10%, 28% e 49% na carga de ruptura das vigas corroídas, respectivamente, aos graus de 5%, 10% e 15% de corrosão. Após o reforço, observou-se que, para ambas as técnicas, UHPRFC ou concreto têxtil, foi possível reabilitar o desempenho estrutural das vigas corroídas ao patamar das vigas não corroídas, independentemente do nível de corrosão. Os resultados mostraram, porém, que houve diferenças entre os métodos de recuperação, indicando melhor desempenho para a aplicação do concreto têxtil.

Mandor e El Refai (2022) estudaram a resposta à flexão de vigas contínuas reforçadas com concreto têxtil de fibra de poliparafenileno benzobisoxazol (PBO). As vigas ensaiadas consistiram em um sistema estrutural de dois vãos com deficiências de flexão em suas seções críticas, necessitando de reforço para manter a sua capacidade de suporte. Os parâmetros investigados incluíram o número de camadas de têxtil, a localização da seção deficiente e a posição dos sistemas de reforço. Os resultados dos ensaios em termos de deformações, modos de ruptura, capacidade de carga e momento, ductilidade e relações de redistribuição de momento entre as seções críticas foram apresentados. Além disso, os autores verificaram que o reforço têxtil melhorou a rigidez e a capacidade de carga das vigas contínuas com redução insignificante da ductilidade. Por fim, a capacidade de redistribuição de momentos observada durante os ensaios abre caminho para a aplicação dessa técnica de reforço em outros elementos de concreto armado em que a redistribuição de momentos é importante.

Giese (2019) idealizou o comportamento de vigas de concreto armado reforçadas com concreto têxtil, como ilustrado na Figura 28. No trecho I, a viga encontra-se no patamar elástico, no qual as tensões de tração são inferiores às resistências da matriz e do substrato, promovendo pequenas deformações e, conseqüentemente, pequenos deslocamentos verticais. Quando as matrizes de cimento de ambos os compósitos têm suas resistências à tração superadas, ocorre a formação das primeiras fissuras, caracterizando o início do trecho II. Nesse instante, as matrizes deixam de contribuir efetivamente para o equilíbrio da seção e as tensões de tração passam a ser resistidas pelas barras de aço e pelo têxtil. Logo, observa-se o comportamento linear da curva, em função da ativação do aço e do têxtil. Nesse trecho, a contribuição do aço é predominante, havendo pouca participação do têxtil.

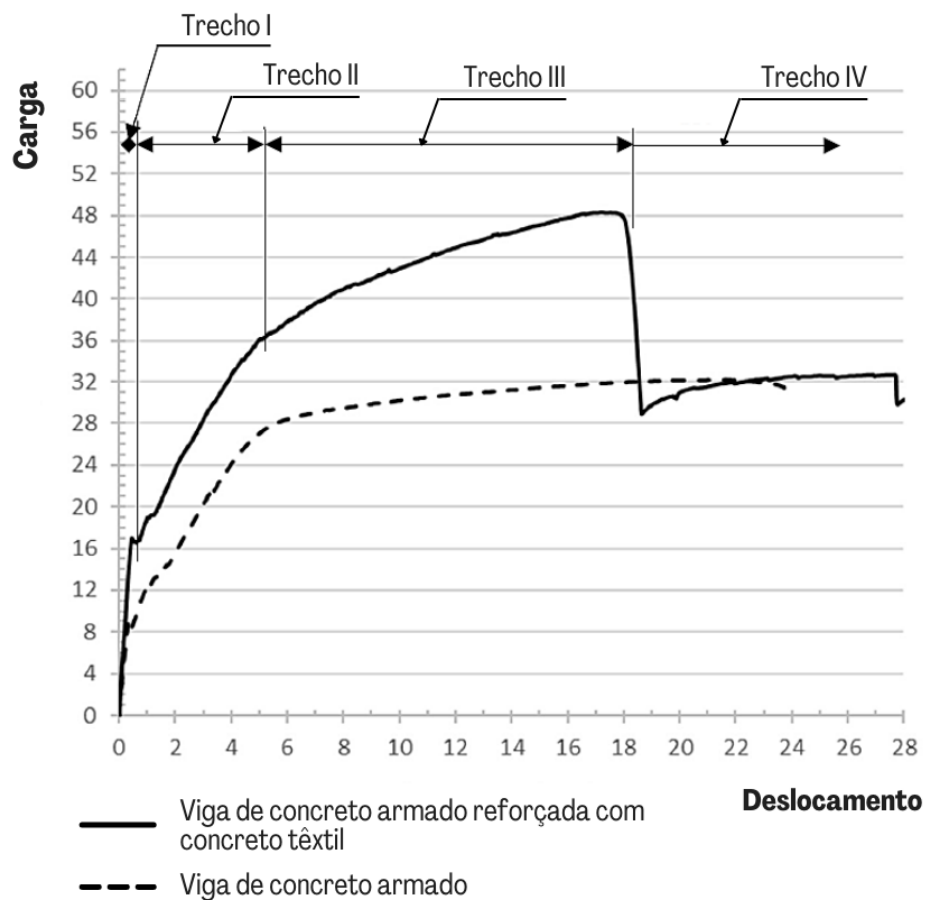


Figura 28 – Curva da carga em função do deslocamento de vigas em concreto armado reforçadas com concreto têxtil submetidas ao ensaio de flexão a quatro pontos (Fonte: Adaptado de GIESE, 2019)

Com o aumento progressivo da carga, o aço atinge a tensão de escoamento, caracterizando o início do trecho III. Com o escoamento do aço, o aumento da capacidade de carga da viga reforçada passa a depender, principalmente, do têxtil. Tal comportamento é evidenciado pela mudança de inclinação da curva. Por fim, quando o têxtil atinge a tensão de ruptura, inicia-se o trecho IV, caracterizado pela queda abrupta da capacidade de carga e a ruptura do elemento estrutural (GIESE, 2019).

2.4.2 Interface matriz-substrato

Ao se fazer a reabilitação de estruturas de concreto armado, onde há a necessidade de união entre concretos de diferentes idades, é fundamental que se tenha conhecimento dos parâmetros que promovem aderência entre a matriz e o substrato.

Devido à diversidade de materiais e técnicas, há uma vasta bibliografia sobre os fatores que afetam o vínculo entre o substrato e a sobreposição. A comparação entre os resultados de tantas pesquisas é inviável, uma vez que a natureza complexa do procedimento limita esse tipo de relação. Por este motivo, com o intuito de tornar a aplicação do concreto têxtil a mais simples possível e, ao mesmo tempo, tão eficiente quanto o necessário, buscou-se referências na literatura sobre os diferentes métodos de preparo da superfície de concreto.

O objetivo da pesquisa de Júlio et al. (2004) consistiu na avaliação experimental da resistência da ligação entre duas camadas de concreto, utilizando diferentes técnicas para o aumento da rugosidade superficial: escovação, jato de areia, apicoamento e superfície sem tratamento. Como objetivo secundário, analisou-se a influência de umedecer a superfície do substrato em relação à força de adesão. Com a realização dos ensaios, verificou-se que o jato de areia foi o método que apresentou os maiores valores de aderência nos testes de arrancamento e cisalhamento oblíquo. De acordo com a resistência de aderência sob cisalhamento, aos 28 dias da aplicação, tem-se: jato de areia (14,13 MPa), escovação (10,67 MPa), apicoamento (6,24 MPa) e superfície sem tratamento (1,3 MPa).

Quanto ao umedecimento do substrato, observou-se que umedecer a superfície de concreto não parece influenciar na resistência da ligação. Também foram analisados os coeficientes de variação em função do tipo de tratamento adotado. Verificou-se que os corpos de prova que não receberam tratamento superficial não só apresentaram os menores valores de resistência de união como também apresentaram os maiores valores de coeficiente de variação (33,85%). Inversamente, os elementos tratados com jato de areia apresentaram os maiores valores de resistência de união ao cisalhamento e os menores valores de coeficiente de variação (8,56%).

No experimento realizado por Benshausen (2010), constatou-se que, ao comparar a aderência entre um substrato molhado previamente e outro seco, não houve aumento significativo na aderência, sendo que, em alguns casos, menores valores de resistência foram encontrados nos elementos que se encontravam saturados. Deste modo, pode-se verificar que, quando o substrato está seco, há maior penetração do concreto novo nos poros do concreto do substrato.

De acordo com Courard et al. (2013), o aumento da rugosidade superficial do substrato é um dos mecanismos básicos para promover adesão. Em sua pesquisa, os autores investigaram diferentes métodos abrasivos, a fim de analisar o intertravamento mecânico. Com o programa experimental, constatou-se que, para concretos com resistência à compressão menor que 30

MPa, há ganho de resistência na aderência entre o substrato e o reforço ao se preparar a superfície com jateamento de areia e hidrodemolição. Porém, ao empregar tratamentos mais agressivos, como polimento e apicoamento, houve perda significativa na força de adesão, o que não ocorreu com concretos mais resistentes.

De acordo com a pesquisa, para métodos muito agressivos podem surgir efeitos colaterais indesejáveis, como o desenvolvimento de microfissuras no interior do substrato. Assim, para substratos de concreto com classe de resistência à compressão inferior a 30 MPa, recomenda-se tratamentos menos agressivos, pois não geram danos na camada próxima à superfície. No caso de substratos de concreto com resistência superior, é preferível a utilização de tratamentos mais agressivos, que aumentam significativamente o perfil da superfície e melhoram o intertravamento mecânico.

2.4.3 Tratamento do substrato

De acordo com Souza e Ripper (1998), a técnica de jateamento sob pressão de granalhas de aço é uma alternativa viável ao jateamento de areia. É mais abrasiva e menos poluente que o jato de areia, não sendo aplicável, no entanto, em casos de existência de armaduras expostas, corroídas e com redução de seção, ou quando for necessário controle rigoroso de rugosidade, em termos de profundidade de desgaste do concreto.

Ao ser empregado como tratamento superficial do substrato, o jateamento de granalhas de aço causa a quebra da superfície menos resistente do concreto e a abertura imediata dos poros, o que promove a capacidade aderente à matriz do reforço. Neste método, não há necessidade do uso de água (SOUZA; RIPPER, 1998). A rugosidade do substrato, resultante do jateamento, depende da dimensão dos elementos metálicos, da vazão do abrasivo, da velocidade do equipamento e da distância de execução.

Complementar ao jateamento de granalhas de aço, para a limpeza do substrato, tem-se o jato de ar comprimido. Esta técnica é utilizada, principalmente, para a remoção de poeira e partículas menores que ficam na superfície do substrato e/ou em pontos de difícil acesso. De acordo com Souza e Ripper (1998), o equipamento deve ser dotado de filtro de ar e óleo, de modo a garantir que o ar não esteja sujo e que venha a interferir na aderência da matriz ao substrato.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo é detalhada a estrutura do programa experimental. São descritas as variáveis e os parâmetros de estudo, os materiais utilizados, os procedimentos, os métodos e os ensaios.

3.1 VARIÁVEIS DA PESQUISA

De acordo com o problema de pesquisa descrito no Capítulo 1, em conjunto com a revisão da literatura, realizou-se uma pesquisa experimental com o objetivo de avaliar o uso do concreto têxtil como material de reforço para vigas em concreto armado em situações próximas à necessidade de um reforço em campo. Em vista disso, além de explorar novas variáveis, este estudo busca dar continuidade aos trabalhos de Giese (2019) e Dalazen (2021) sobre estruturas de concreto armado reforçadas à flexão com concreto têxtil, desenvolvidos no Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais (LEME) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

A partir dos resultados obtidos nos trabalhos citados, estabeleceu-se trabalhar com as seguintes variáveis de investigação:

- a) Tipo da matriz: argamassa polimérica industrializada ou argamassa autoadensável;
- b) Revestimento do reforço: sem revestimento, têxtil revestido com epóxi, têxtil revestido com epóxi e areia ou têxtil revestido com epóxi e areia somente nas extremidades.

De modo geral, o programa experimental é composto por 14 vigas de concreto armado reforçadas à flexão e 1 viga testemunho, totalizando 15 vigas. Procurou-se analisar, também, a viga testemunho por meio da modelagem computacional no *software* ANSYS (*Analysis System Incorporated*) na versão *Student 2022 R2*. Para a variável “tipo da matriz”, detalhada em 3.1.1, tem-se o reforço de 7 vigas com argamassa polimérica industrializada e 7 vigas com argamassa autoadensável. Para a variável “revestimento do reforço”, detalhada em 3.1.2, com exceção do têxtil sem revestimento, tem-se 2 repetições para cada viga, tal como apresentado na Tabela 6. O significado dos códigos de referência pode ser verificado na Figura 29.

Método de fabricação	Matriz	Revestimento do têxtil	Nº da viga	Código de referência	Lotes		
Laminação	Argamassa industrializada polimérica	Sem revestimento	1	M1-SR/V1	Lote 1		
		Epóxi	2	M1-E-R1/V2			
		Epóxi	3	M1-E-R2/V3			
				Epóxi e areia	4	M1-EA-R1/V4	Lote 2
				Epóxi e areia	5	M1-EA-R2/V5	
				Epóxi e parcial de areia	6	M1-EAP-R1/V6	
				Epóxi e parcial de areia	7	M1-EAP-R2/V7	
Moldagem	Argamassa autoadensável	Sem revestimento	8	M2-SR/V8	Lote 3		
		Epóxi	9	M2-E-R1/V9			
		Epóxi	10	M2-E-R2/V10			
				Epóxi e areia	11	M2-EA-R1/V11	Lote 4
				Epóxi e areia	12	M2-EA-R2/V12	
				Epóxi e parcial de areia	13	M2-EAP-R1/V13	
				Epóxi e parcial de areia	14	M2-EAP-R2/V14	
		Viga testemunho	15	VT/V15			

Tabela 6 – Variáveis da pesquisa (Fonte: Autor)

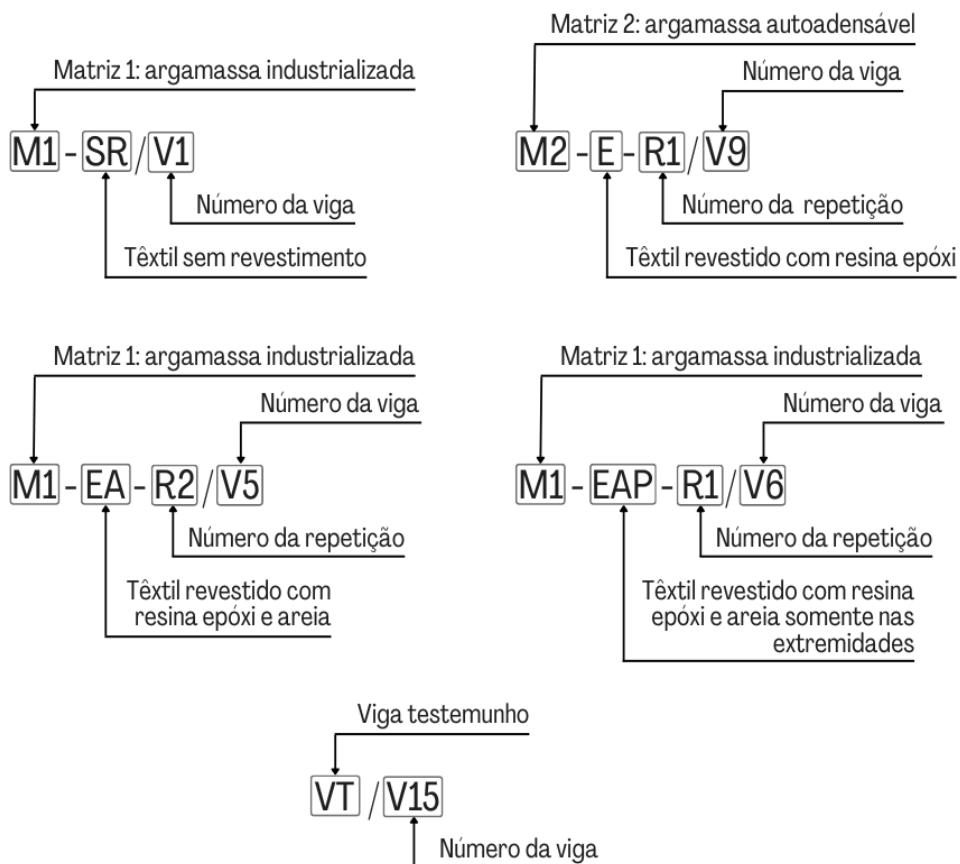


Figura 29 – Códigos de referência das vigas (Fonte: Autor)

3.1.1 Tipo da matriz

Nos compósitos cimentícios têxteis, a matriz é responsável por envolver e proteger o reforço, além de transmitir e distribuir os esforços. Sua composição é essencial para a eficiência e durabilidade do material. Embora as pesquisas experimentais apresentem compósitos com excelentes comportamentos estruturais, outros aspectos técnicos, como propriedades mecânicas no estado fresco e endurecido, tipo e geometria do têxtil, compatibilidade química entre matriz e reforço, e métodos de produção devem ser considerados.

Com base nos resultados obtidos por Giese (2019), Reginato (2020) e Dalazen (2021), que mostram a viabilidade do uso de reforços cimentícios têxteis na resposta de vigas submetidas à flexão, verifica-se que o uso da argamassa industrializada, apesar de proporcionar excelentes resultados mecânicos em termos de desempenho, apresenta certas limitações, como por exemplo: método de execução do reforço por laminação, tempo de execução do reforço devido à trabalhabilidade da argamassa, disposição invertida da viga (posição usual de laboratório) e geometria do têxtil bidimensional, entre outros.

Deste modo, verifica-se a necessidade de uma composição matricial que estimule métodos de produção mais ágeis, liberdade de formas e aplicações, como em superfícies verticais, inclinadas ou naturais, e que permita o uso de geometrias mais complexas, como têxteis tridimensionais.

Em vista disso, para a variável “tipo da matriz”, decidiu-se investigar o método de produção do compósito a partir do tipo de matriz mais adequada para a realização do reforço. Para a matriz 1, decidiu-se manter o uso da argamassa industrializada, empregada nas pesquisas experimentais realizadas anteriormente no LEME/UFRGS. Para a matriz 2, optou-se pelo uso de uma argamassa autoadensável, que no estado fresco é capaz de fluir pelo reticulado têxtil e escoar pela fôrma, preenchendo todos os espaços, sem a necessidade de intervenção. Informações detalhadas sobre as matrizes são apresentadas em 3.3.1.

Em síntese, denominou-se por “matriz 1”, as vigas reforçadas com argamassa polimérica industrializada através do método da laminação, e por “matriz 2”, as vigas reforçadas com argamassa autoadensável por meio do método da moldagem. Com esta configuração, espera-se contribuir com as investigações do uso do concreto têxtil como material de reforço em estruturas sob diferentes condições.

3.1.2 Revestimento do reforço

O comportamento mecânico do concreto têxtil varia de acordo com as características e propriedades da matriz, do reforço e, principalmente, das ligações desenvolvidas entre eles. Quando aplicado na reabilitação de estruturas de concreto armado, o desempenho do elemento reforçado depende de boa aderência nas interfaces filamento-filamento, têxtil-matriz e matriz-substrato. Problemas de ligação nas interfaces filamento-filamento e/ou têxtil-matriz, como observado nos resultados experimentais de Giese (2019), em que o modo de ruptura dos reforços de todas as vigas se deu por falta de ancoragem do têxtil (deslizamento), fazem com o que o potencial máximo do concreto têxtil não seja alcançado.

O fato de isso ocorrer indica que tanto a aderência filamento-filamento quanto a aderência têxtil-matriz apresentaram resistência de ligação insuficiente. Em vista disso, a segunda variável busca investigar formas de melhorar a qualidade de ligação nas interfaces filamento-filamento e têxtil-matriz dos têxteis nacionais, a partir do tratamento do reforço com resina epóxi e com resina epóxi seguida de areia, conforme apresentado na Figura 30. Com este procedimento, espera-se contribuir para a ancoragem do reforço, melhorando a capacidade resistente do elemento reforçado.

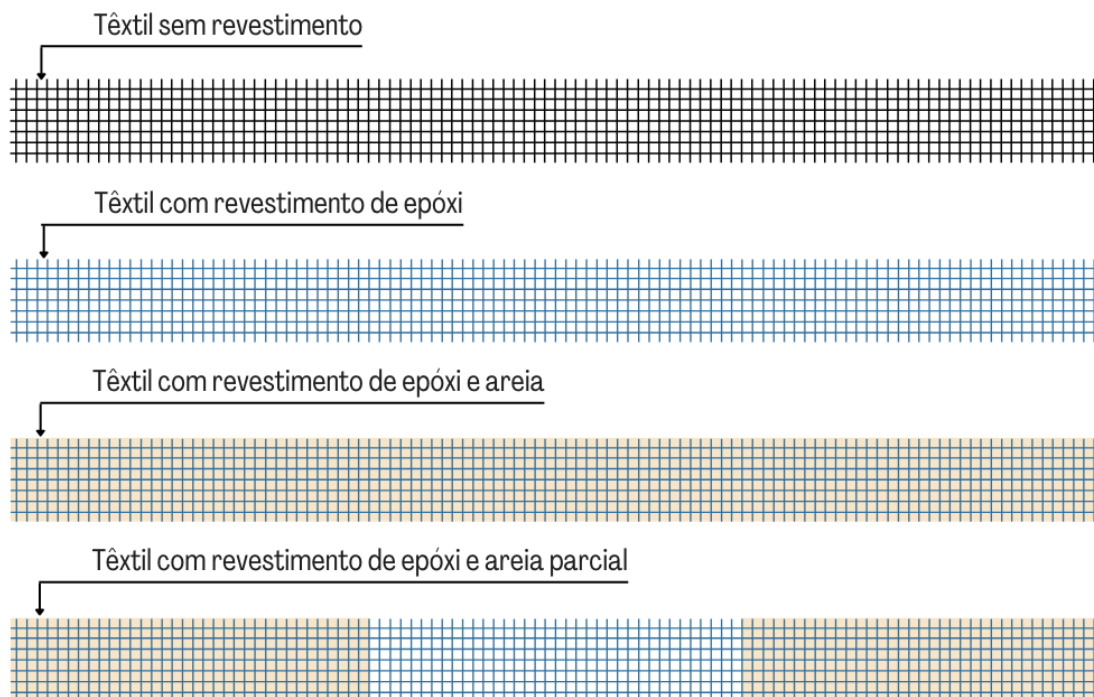


Figura 30 – Configurações de revestimento para o têxtil (Fonte: Autor)

3.2 PARÂMETROS DA PESQUISA

Os parâmetros da pesquisa correspondem às definições iniciais, necessárias para a elaboração do programa experimental. Como primeiro parâmetro, decidiu-se trabalhar com vigas de resistência à compressão igual a 25 MPa.

Com o objetivo de avaliar o comportamento do concreto têxtil, ao ser aplicado como reforço em condições semelhantes àsquelas encontradas em campo, como no caso de vigas que perderam parte da sua capacidade resistente e/ou apresentam taxa de armadura insuficiente, como segundo parâmetro, decidiu-se trabalhar com vigas subarmadas, com taxa de armadura longitudinal de tração de 0,16%, aproximadamente.

Com base nos resultados das pesquisas de Courard et al. (2013), Júlio et al. (2004), Giese (2019) e Dalazen (2021), verificou-se que a técnica de jateamento se mostrou eficaz. Por conseguinte, como terceiro parâmetro, decidiu-se por manter a técnica como tratamento superficial do substrato.

Neste sentido, a pesquisa de Giese (2019) analisou a eficiência do jateamento de granalhas de aço para diferentes configurações de material, distância e posição do operador. Devido à boa capacidade de desgaste superficial do substrato, decidiu-se por manter a utilização da granalha G80, de diâmetro médio igual a 0,3 mm, aplicação próxima ao substrato e jato na direção diagonal.

Para a limpeza da viga, como quarto parâmetro, utilizou-se de brocha plástica retangular. O quinto parâmetro refere-se ao número de camadas de reforço, para o qual definiu-se trabalhar com três camadas de têxtil. A definição dos parâmetros está mostrada na Tabela 7.

<i>Resistência do concreto (MPa)</i>	<i>Taxa de armadura</i>	<i>Tratamento do substrato</i>	<i>Limpeza do substrato</i>	<i>Reforço têxtil</i>
25	Viga subarmada $\rho = 0,16\%$	Jateamento de granalhas de aço	Manual com uso de brocha	3 camadas de têxtil de fibra de vidro álcali-resistente

Tabela 7 – Parâmetros da pesquisa (Fonte: Autor)

3.3 DESCRIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Neste item são apresentados os materiais a serem utilizados e suas propriedades.

3.3.1 Materiais utilizados para a produção do concreto têxtil

Os materiais utilizados para a produção do concreto têxtil variam de acordo com a matriz, argamassa industrializada ou autoadensável. Para a produção da matriz 1, seguiu-se as recomendações da empresa fabricante. Para a matriz 2, optou-se por adaptar o traço desenvolvido por Ortolan, Mâncio e Tutikian (2016) e reutilizado por Brescovit (2021) e Ortolan (2021) em suas investigações experimentais.

3.3.1.1 Matriz 1: argamassa industrializada

O mercado da construção civil dispõe de argamassas industrializadas adequadamente dosadas para uso em reparos e reforços de estruturas deterioradas. São, geralmente, comercializadas em sacos. Os tipos variam de acordo com as características da região a ser tratada e o tipo de agressividade promovida pelo ambiente.

A escolha da argamassa tem como premissas básicas as propriedades mecânicas e as áreas de aplicação do material. Optou-se pela argamassa de consistência tixotrópica Nafufill CR (antigo Zentrifix CR), da MC-Bauchemie. De acordo com a empresa fabricante, as áreas de aplicação do produto compreendem reparos em elementos estruturais, como vigas, pilares e lajes, reparos em obras de infraestrutura, como pontes, viadutos, obras marítimas e industriais, reconstituição da superfície de concreto e aumento da espessura de cobrimento, entre outros. As características e propriedades da argamassa são apresentadas na Tabela 8.

A Nafufill CR é descrita como argamassa polimérica cimentícia, monocomponente, composta de agente adesivo integrado e inibidor de corrosão. O material atende aos requisitos da norma EN 1504 parte 3 – Reparos Estruturais/Nãos estruturais, com classificação R4, e encontra-se pronto para uso, sendo necessário, apenas, adicionar água na dosagem indicada (MC-BAUCHEMIE BRASIL, 2020). Por apresentar característica tixotrópica, a aplicação da argamassa Nafufill CR pode ser feita com colher de pedreiro e desempenadeira, exercendo pressão sob o material contra o substrato do centro para as extremidades.

Os fatores trabalhabilidade e executabilidade também foram considerados para a escolha da argamassa. De acordo com a ficha técnica do produto (MC-BAUCHEMIE BRASIL, 2020), a

argamassa Nafufill CR pode ser aplicada em camadas de até 6 mm (espessura mínima), característica essencial para a produção do concreto têxtil.

<i>Característica</i>	<i>Valor</i>	<i>Observações</i>
Densidade	2,15 kg/L	NBR 13278:2005
Tempo de trabalhabilidade	15 min	20 °C e 50% de umidade relativa
Consumo	1849 kg/m ³	74 sacos por m ³
Proporção da mistura	13 - 14%	Para cada 25 kg, utilizar 3,25 - 3,5 L de água
Espessura de aplicação	6 - 60 mm	Por camada
Variação dimensional	-0,7 mm/m	NBR 15261:2005
Ar incorporado	6%	NBR 13278:2005
Resistência à compressão	≥ 35 MPa	01 dia - NBR 7215:1996
	≥ 40 MPa	03 dias
	≥ 45 MPa	07 dias
	≥ 60 MPa	28 dias
Resistência à tração na flexão	≥ 5 MPa	01 dia - NBR 13279:2005
	≥ 9 MPa	28 dias
Aderência (28 dias)	≥ 2 MPa	NBR 15258:2005
Módulo de deformação	31 GPa	NBR 8522:2008
COV (Compostos orgânicos voláteis)	0 g/L	Method 304-91

Os resultados informados em ficha técnica foram obtidos em ensaios realizados em laboratório utilizando a dosagem mínima de água indicada. Para novos lotes ou ensaios em campo, os valores podem apresentar variações.

Tabela 8 – Dados técnicos da argamassa Nafufill CR (Fonte: MC-BAUCHEMIE BRASIL, 2020)

Com o objetivo de caracterizar as propriedades mecânicas da argamassa Nafufill CR, retirou-se amostras de cada mistura elaborada para moldagem de corpos de prova cilíndricos. Posteriormente, foram ensaiados à compressão, segundo as orientações da NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos (ABNT, 2019), e pela NBR 8522: Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação Parte 1: Módulos estáticos à compressão (ABNT, 2021), para determinação do seu módulo de elasticidade estático.

A partir dos ensaios, verificou-se que a resistência à compressão média da argamassa industrializada aos 28 dias foi de 36,90 MPa e a média do módulo de elasticidade estático foi de 32,21 GPa. Detalhes dos ensaios são apresentados em 4.1.5 e 4.1.6.

3.3.1.2 Matriz 2: argamassa autoadensável

De acordo com Tutikian e Dal Molin (2008), os materiais utilizados para a produção da argamassa/concreto autoadensável são os mesmos empregados para o concreto convencional, diferenciando-se pela maior quantidade de finos, adições minerais, aditivos plastificantes, superplastificantes e/ou modificadores de viscosidade. A grande vantagem do material é a sua capacidade de fluir pelo reticulado têxtil, se moldar e preencher as fôrmas por conta própria, sem a necessidade de adensamento, vibração ou qualquer outro tipo de intervenção.

Entretanto, matrizes autoadensáveis podem ser de difícil obtenção, uma vez que demandam estudos teóricos e experimentais sobre composições e proporções, de modo que a mistura atenda aos requisitos de autoadensabilidade. De modo geral, os métodos de dosagem de misturas autoadensáveis são definidos a partir de ensaios com argamassas, uma vez que possibilitam prever o comportamento do material, com a adição de maior número de variáveis e menor consumo de materiais e recursos humanos (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Deste modo, em razão da diversidade de materiais, com variações significativas de composições e propriedades, a escolha pelo traço da matriz autoadensável procurou atender simultaneamente propriedades como: resistência à compressão semelhante à da argamassa industrializada, habilidade passante, capacidade de preenchimento, resistência à segregação e à exsudação. Requisitos acerca da disponibilidade dos materiais em laboratório, prazos para a aquisição e questões orçamentárias também foram considerados.

Por conseguinte, decidiu-se por adaptar o traço desenvolvido por Ortolan, Mancio e Tutikian (2016) e reutilizado por Brescovit (2021) e Ortolan (2021), cujas pesquisas envolvem o estudo de compósitos cimentícios têxteis para a produção e durabilidade de painéis. Em sua pesquisa de mestrado, Brescovit (2021), avaliou o comportamento de compósitos cimentícios têxteis de fibra de vidro AR através do envelhecimento acelerado com ciclos de variação de temperatura. O traço da matriz de Brescovit (2021) seguiu o empregado por Ortolan (2021), cuja pesquisa de doutorado baseou-se no estudo da matriz para uso em painéis com têxtil de fibra de vidro AR, diferenciando-se quanto a inserção ou não de fibras curtas.

A diferença entre o traço utilizado por Ortolan (2021) e o empregado nesta pesquisa refere-se ao percentual de aditivo superplastificante, reduzido de 1,35% para 1,10%. Fez-se esta redução com base em testes de consistência, detalhados em 4.1.4, uma vez que se obteve o

espalhamento médio de 330 mm com o percentual reduzido. As características da matriz autoadensável obedece ao traço apresentado na Tabela 9.

<i>Materiais</i>	<i>Traço</i>	<i>Consumo</i>	<i>Unidade</i>
Cimento CPV-ARI	0,93	550,00	kg/m ³
Sílica ativa	0,07	39,50	kg/m ³
Areia	2,10	1239,00	kg/m ³
Relação água/aglomerante	0,40	236,00	kg/m ³
Aditivo superplastificante	1,10%	6,49	kg/m ³

Tabela 9 – Traço da matriz autoadensável (Fonte: adaptado de ORTOLAN, 2021)

Para a produção da matriz autoadensável, utilizou-se o cimento Portland de alta resistência inicial CP V-ARI RS da empresa Companhia Nacional de Cimentos (CNC). Normatizado pela NBR 16697 (ABNT, 2018), a sua composição está apresentada na Tabela 10.

<i>Substância</i>	<i>Concentração em massa (%)</i>
Silicato tricálcico	20 - 70
Silicato dicálcico	10 - 60
Ferro-aluminato de cálcio	5 - 15
Sulfato de cálcio	2 - 8
Aluminato tricálcico	1 - 15
Carbonato de cálcio	0 - 25
Óxido de magnésio (livre)	0 - 6
Óxido de cálcio (livre)	0 - 2

Tabela 10 – Composição CPV ARI da Companhia Nacional de Cimentos (Fonte: CNC, 2018)

Como adição pozolânica, adicionou-se 7% de sílica ativa da empresa Tecnosil. As características físicas e químicas informadas pela fabricante, são mostradas na Tabela 11.

<i>Característica</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidade</i>
Massa específica	2,22	g/cm ³
Teor de SiO ₂	> 90	%
Superfície específica (B.E.T.)	~19.000	cm ² /g
Formato da partícula	Esférico	-
Diâmetro médio da partícula	0,20	µm

Tabela 11 – Características físicas e químicas da sílica ativa (Fonte: Tecnosil, 2022)

A sílica ativa é um pó fino pulverizado de origem metalúrgica, obtido do processo de fabricação do silício metálico ou ferro silício. De acordo com a fabricante, a adição de teores entre 5 e 8% melhora as características dos concretos e argamassas.

Como agregado miúdo, utilizou-se areia quartzosa de rio isenta de material orgânico. Com o auxílio de um conjunto de peneiras elétricas obteve-se as proporções em massa apresentadas na Tabela 12 e na Figura 31.

<i>Peneira</i>	<i>Percentual retido</i>	<i>Percentual retido acumulado</i>
2,36 mm	0,00%	0,00%
1,18 mm	0,38%	0,38%
0,60 mm	0,71%	1,09%
0,30 mm	17,47%	18,56%
0,15 mm	59,96%	78,52%
0,075 mm	17,03%	95,55%
Fundo	4,45%	100,00%

Tabela 12 – Análise granulométrica da areia (Fonte: Autor)

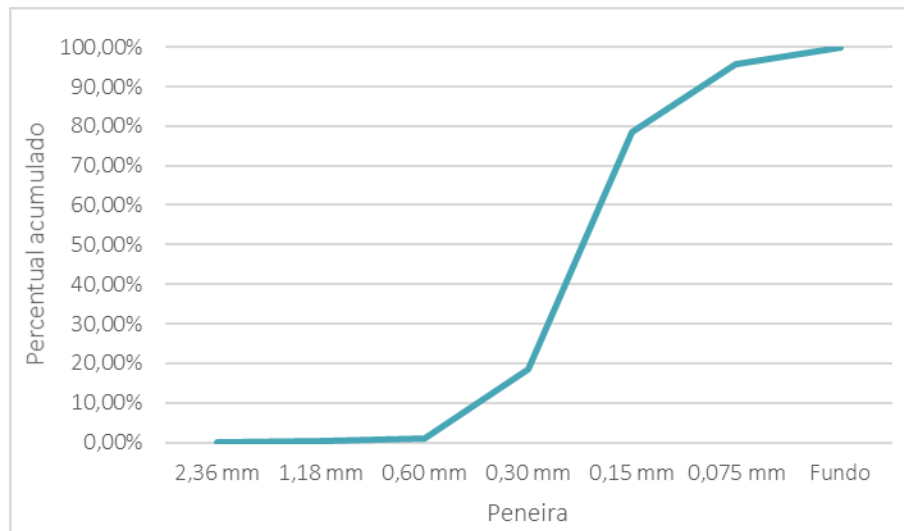


Figura 31 – Curva granulométrica acumulada da areia (Fonte: Autor)

Quanto ao superplastificante, utilizou-se o aditivo redutor de água tipo 2 – RA2 (superplastificante à base de polímeros policarboxilatos) MC-Powerflow 4000, doado pela empresa MC-Bauchemie. De acordo com a empresa fabricante, o aditivo MC-PowerFlow 4000 requer tempos de mistura relativamente curtos e foi desenvolvido para proporcionar

longos tempos de trabalhabilidade ao concreto sem prejuízo à resistência inicial. As características informadas pela fabricante são apresentadas na Tabela 13.

<i>Característica</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidade</i>
Densidade	1,12	kg/L
Dosagem recomendada	$\geq 0,2\% \leq 5,0\%$	-
Estado	Líquido	-
Cor	Marrom	-

Os dados técnicos se referem à temperatura de 23 °C (+/- 2 °C) e 60 % (+/- 2 %) de umidade relativa do ar. Temperaturas altas e umidades baixas aceleram, enquanto temperaturas baixas e umidades altas retardam o tempo de aplicação. Conforme a norma NBR 14082:2004.

Tabela 13 – Dados técnicos do aditivo MC-PowerFlow 4000 (Fonte: MC-BAUCHEMIE BRASIL, 2022)

A partir dos ensaios, verificou-se que a resistência à compressão média da argamassa autoadensável aos 28 dias foi de 40,44 MPa e a média do módulo de elasticidade estático foi de 29,33 GPa. Detalhes dos ensaios são apresentados em 4.1.5 e 4.1.6.

3.3.1.3 Têxtil

Para o reforço da matriz, optou-se pelo têxtil de fibra de vidro álcali-resistente AR-360-RA-04, da empresa TEXIGLASS. De fabricação nacional, o têxtil foi adquirido anteriormente pelo LEME/UFRGS para ser empregado nas pesquisas de Dalazen (2021) e Giese (2019). Fabricado por meio de tecelagem, o têxtil do tipo leno apresenta os fios de urdume torcidos em torno dos fios de trama, de modo a formar um reticulado, como mostrado na Figura 32.

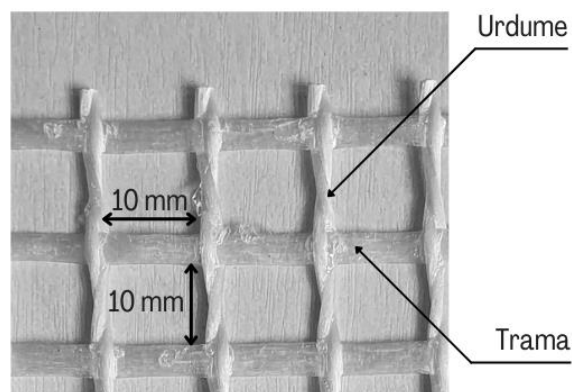


Figura 32 – Têxtil AR-360-RA-04 (Fonte: TEXIGLASS, 2021)

De acordo com a fabricante, todos os têxteis são tratados superficialmente com resina acrílica sem função estrutural. O procedimento é realizado, apenas, para que a tecelagem não se desfaça durante o manuseio. O significado do código de referência da resina é apresentado na Figura 33. As características do têxtil são apresentadas na Tabela 14.

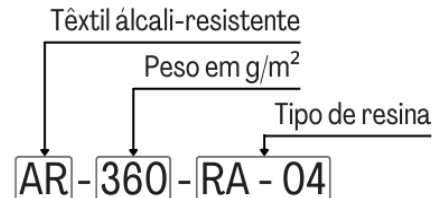


Figura 33 – Código de referência do têxtil (Fonte: TEXIGLASS, 2021)

<i>Parâmetros</i>	<i>Unidade</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Nominal</i>	<i>Máximo</i>
Peso	g/m ²	324	360	396
Número de fios de urdume	fios/cm	0,71	0,75	0,79
Número de fios de trama	fios/cm	0,68	0,75	0,83
Largura	cm	126	130	134
Comprimento do rolo	m	90	100	110
Tamanho total do rolo	m ²	113	130	147
Espessura sem resina	mm	0,45	0,55	0,65
Espessura resinado	mm	0,95	1,15	1,35
Carga de ruptura teórica do urdume	Kgf/cm	43	54	59
Carga de ruptura teórica da trama	Kgf/cm	43	54	59
Porcentagem de resina em peso	%	17	20	23

Tabela 14 – Dados técnicos do têxtil AR-360-RA-04 (Fonte: TEXIGLASS, 2021)

No intuito de caracterizar as dimensões dos fios do têxtil AR-360-RA-04, Dalazen (2021) analisou o material através do estereomicroscópio e do microscópio eletrônico de varredura (MEV), conforme pode ser visto nas Figuras 34 e 35, respectivamente. A partir de medições da seção transversal de diversos fios de urdume, constatou-se uma área média de 1,75 mm².

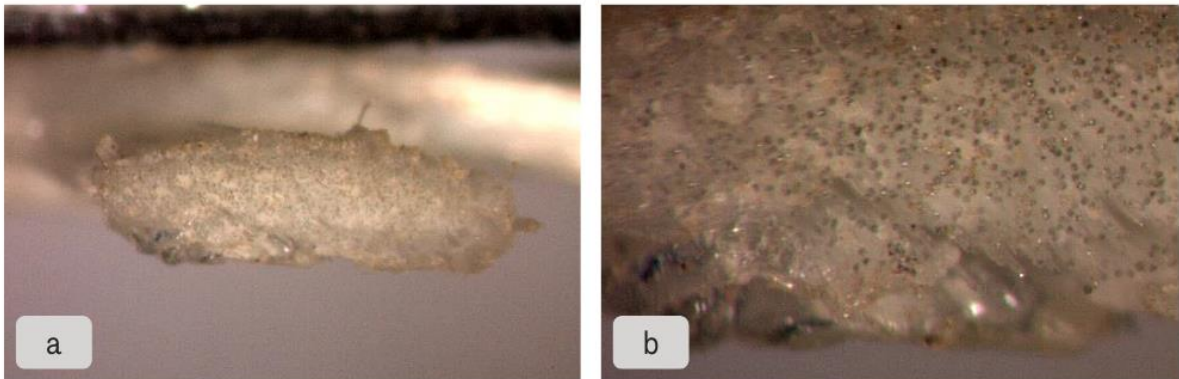


Figura 34 – AR-360-RA-04 ampliado 79 vezes (a) e 225 vezes (b) no estereomicroscópio
(Fonte: DALAZEN, 2021)

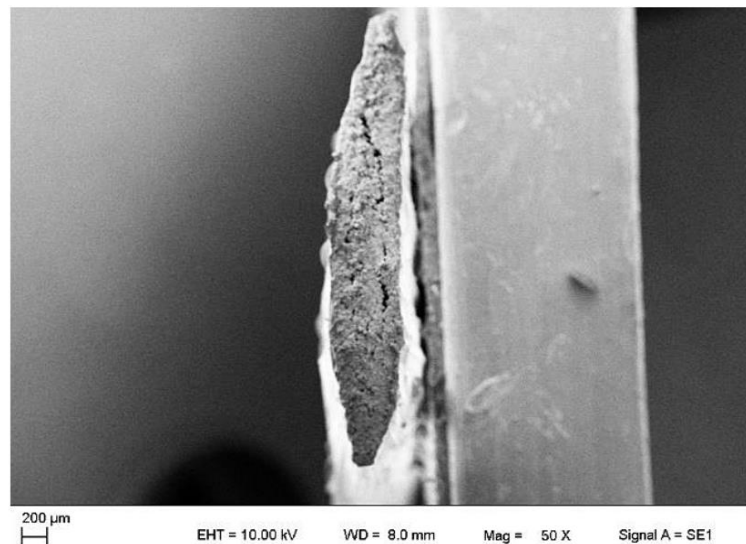


Figura 35 – AR-360-RA-04 ampliado 50 vezes no microscópio eletrônico de varredura
(Fonte: DALAZEN, 2021)

Posteriormente, para determinar as propriedades mecânicas do têxtil, Dalazen (2021) submeteu corpos de prova com 20 centímetros de comprimento livre ao ensaio de tração direta em uma máquina universal de aplicação de carga MTS com capacidade de até 100 kN.

Com o objetivo de evitar o deslizamento dos fios, as extremidades dos têxteis foram revestidas com resina epóxi Sikadur®-32 e pressionadas entre duas placas de papel cartão, diferenciando-se pelo número de fios de urdume, como mostrado na Figura 36. Os resultados podem ser verificados na Tabela 15.

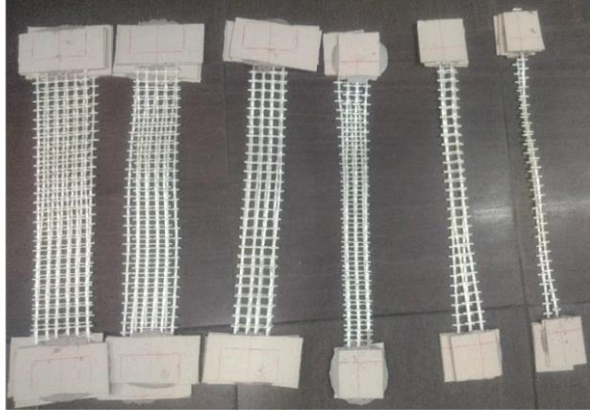


Figura 36 – Preparação do têxtil para o ensaio de tração direta (Fonte: DALAZEN, 2021)

<i>Nº de urdumes</i>	<i>Carga de ruptura (kN)</i>	<i>CP1</i>	<i>CP2</i>
1	0,66	0,64	0,68
2	1,52	1,49	1,55
3	1,97	1,97	-
4	2,92	2,92	-
5	3,36	3,07	3,65
6	3,77	3,37	4,17

Tabela 15 – Cargas de ruptura do têxtil AR-360-RA-04 (Fonte: DALAZEN, 2021)

De acordo com Dalazen (2021), alguns resultados foram descartados, pois, embora as fibras de vidro tenham mostrado compatibilidade com a resina epóxi Sikadur®-32, alguns corpos de prova deslizaram na região próxima às garras.

3.3.1.4 Adesivo epoxídico

Com o objetivo de melhorar a ligação na interface têxtil-matriz, será realizado o revestimento com resina epóxi Sikadur®-32 da empresa Sika. De acordo com a descrição da empresa fabricante, a Sikadur®-32 é um adesivo estrutural à base de resina epóxi, de média viscosidade (fluido), bicomponente, especialmente formulado para colagens em geral, de concreto velho com concreto novo e chapas metálicas ao concreto. Apesar de possuir consistência fluida, não é autonivelante (SIKA, 2019).

De acordo com as orientações da Ficha Técnica de Produto Sikadur®-32, a mistura dos componentes A e B deve ser feita por misturador elétrico (400 a 500 rpm), por 3 minutos, ou manualmente, por 5 minutos, até que o produto se torne homogêneo e sem grumos. A

aplicação da resina pode ser feita com espátula, pincel, trincha ou outros meios equivalentes. Uma camada entre 1 e 2 mm de espessura é o suficiente para promover aderência (SIKA, 2019). Os dados técnicos do produto são apresentados na Tabela 16.

<i>Dados do produto</i>		<i>Observações</i>	
Base química	Epóxi		
Densidade	~1,5 kg/L	(A+B) (23 °C)	
Resistência à compressão	60 MPa	1 dia; 23 °C; 50% u.r.	(ASTM D 695)
	80 MPa	7 dias; 23 °C; 50% u.r.	
Resistência à flexão	~ 50 MPa	7 dias	(ASTM C 580)
		18,4 MPa (14 dias)	(ASTM C 882)
Resistência adesiva à tração	Concreto:	3,8 MPa (7 dias) - falha no concreto	Teste Pull Off
	Aço	~ 12 MPa (3 dias)	Teste Pull Off
Temperatura de serviço	Mín. 10 °C	Máx. 60 °C	
Proporção da mistura	A : B = 2 : 1 (em peso)		
Consumo	Sikadur®-32 (A + B): 1,50 kg/m ² por mm de espessura		
Temperatura ambiente	Mín. 10 °C	Máx. 60 °C	
Pot life	1 kg: 45 minutos (23°C)		
Tempo de cura	Cura inicial: 24 horas		
	Cura final: 7 dias		

Tabela 16 – Dados técnicos da resina epóxi Sikadur®-32 (Fonte: Adaptado de SIKA, 2019)

3.3.1.5 Areia (revestimento do têxtil)

Para o revestimento do têxtil, utilizou-se areia quartzosa de rio com diâmetro entre 0,15 e 0,60 mm. Com o auxílio de um conjunto de peneiras elétricas obteve-se as proporções em massa de 51,65% de 0,60 mm, 39,82% de 0,30 mm e 8,53% de 0,15 mm. Antes da aplicação sobre a resina, o agregado miúdo foi seco em estufa de secagem e esterilização com circulação e renovação de ar da SP Labor por 24 horas a 110 °C.

3.3.2 Materiais utilizados para a produção das vigas de concreto armado

Para a estruturação do programa experimental, definiu-se trabalhar com vigas fabricadas por empresa terceirizada, de resistência a compressão igual a 25 MPa. Os materiais utilizados para a produção das vigas de concreto armado, com exceção do aço, foram fornecidos pela empresa responsável pela concretagem. Foram empregados cimento Portland CPV-ARI RS, areia natural (fina e média), brita basáltica n.º 0 e aditivo superplastificante.

3.3.2.1 Aço

As barras longitudinais e os estribos de CA-60, ambos com diâmetros de 5,0 mm, foram fornecidos gratuitamente pela empresa ArcelorMittal, cortados e dobrados nas dimensões necessárias para a pesquisa. A utilização de barras com diâmetros de 5,0 mm deve-se à tentativa de reprodução da perda de seção que ocorre nas armaduras quando o aço é atacado por corrosão, situação em que ocorre a redução da seção transversal e a ductilidade é afetada negativamente. A configuração das armaduras, empregadas para o reforço das vigas de concreto armado, é apresentada a seguir, na descrição do programa experimental.

Para a caracterização do aço, observou-se as recomendações da NBR ISO 6892-1: Materiais metálicos - Ensaio de Tração - Parte 1 - Método de ensaio à temperatura ambiente (ABNT, 2018). Verificou-se a tensão média de escoamento de 738,48 MPa e a tensão média de ruptura de 768,72 MPa. A descrição do ensaio está apresentada em 4.1.3.

3.3.2.2 Cimento

Para a produção das vigas de concreto armado, utilizou-se o cimento Portland de alta resistência inicial CP V-ARI RS da empresa Votorantim Cimentos Brasil, normatizado pela NBR 16697 (ABNT, 2018). De acordo com a empresa fabricante, este tipo de cimento contém silicatos de cálcio, alumínio e ferro, sulfato de cálcio e fíller carbonático. Amplamente utilizado em estruturas pré-moldadas de concreto, caracteriza-se pela alta reatividade, resistência elevada em baixas idades, redução do tempo de secagem e cura e aumento da velocidade de desforma.

3.3.2.3 Aditivo superplastificante

Na composição do traço, utilizou-se o aditivo ADVA® 518. De acordo com o fabricante, o produto atende aos requisitos da NBR 11768: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland Parte 1: Requisitos (ABNT, 2019) e é indicado para concretos dosados em central, pré-fabricados e protendidos. De acordo com a empresa contratada para a concretagem, o aditivo ADVA® 518 foi adicionado sobre o concreto fresco no final do carregamento junto com a água restante do traço. As propriedades do material estão apresentadas na Tabela 17.

<i>Característica</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidade</i>
Massa específica	1,06 - 1,08	g/cm ³
Dosagem recomendada	$\geq 0,5\% \leq 1,0\%$	-
Estado	Líquido	-
Cor	Alaranjado	-

Tabela 17 – Dados técnicos do aditivo ADVA® 518 (Fonte: GCP APPLIED TECHNOLOGIES INC., 2022)

3.4 CONCRETAGEM DAS VIGAS

Devido às limitações de funcionamento do laboratório impostas pela pandemia de Covid-19 e com o objetivo de prezar pela homogeneidade das vigas, preferiu-se pela contratação do serviço de concretagem, realizado por empresa terceirizada. A concretagem das vigas foi realizada no dia 24 de janeiro de 2022 por fábrica de estruturas de pré-moldadas e artefatos de concreto, localizada no município de Bom Princípio, Rio Grande do Sul. As armaduras foram enviadas montadas e instrumentadas com extensômetros nas barras longitudinais de tração.

3.4.1 Geometria das vigas

Devido a este trabalho ser uma continuidade de estudos teóricos e experimentais realizados no LEME da UFRGS, as dimensões das vigas foram definidas quanto à viabilidade de manuseio em laboratório, ou seja, com peso inferior a 100 kg e limitadas pelas dimensões da prensa: comprimento máximo de 150 cm e largura máxima de 12 cm. Para a altura da seção, realizou-se uma análise de sensibilidade, conforme detalhada por Giese (2019). Após as verificações, definiu-se a seção transversal de 12 cm de largura e 20 cm de altura, respeitando as dimensões mínimas estabelecidas pela NBR 6118 (ABNT, 2014).

O dimensionamento das vigas ocorre no estágio III ou estado-limite último (ELU), onde o aço e o concreto trabalham em seus limites, apresentando escoamento por tração e encurtamento por compressão, respectivamente. Com o objetivo de avaliar o comportamento do concreto têxtil, ao ser aplicado como reforço em vigas que perderam parte da sua capacidade resistente devido à corrosão e/ou apresentaram taxa de armadura insuficiente, optou-se por trabalhar com vigas subarmadas que, por possuírem uma taxa de armadura muito pequena, rompem no domínio 2.

Logo, a armadura longitudinal positiva é composta por 2 barras de aço CA-60, de 5,0 mm de diâmetro, correspondendo a uma taxa de armadura de 0,001625, ou 0,16%, aproximadamente. A armadura longitudinal negativa é composta, também, por 2 barras de aço CA-60, de 5,0 mm de diâmetro. Este parâmetro encontra-se de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), que estabelece que a armadura mínima de tração, em elementos estruturais armados ou protendidos, deve ser determinada a partir do dimensionamento da seção a um momento fletor mínimo de cálculo, respeitando a taxa mínima absoluta 0,15%. A armadura transversal consiste em estribos de diâmetro igual a 5,0 mm, espaçados uniformemente a cada 5 cm. Quanto ao cobrimento, adotou-se 2,0 cm. Após receber o reforço, a viga tem a altura acrescida em 3,00 cm, como pode ser visto na Figura 37.

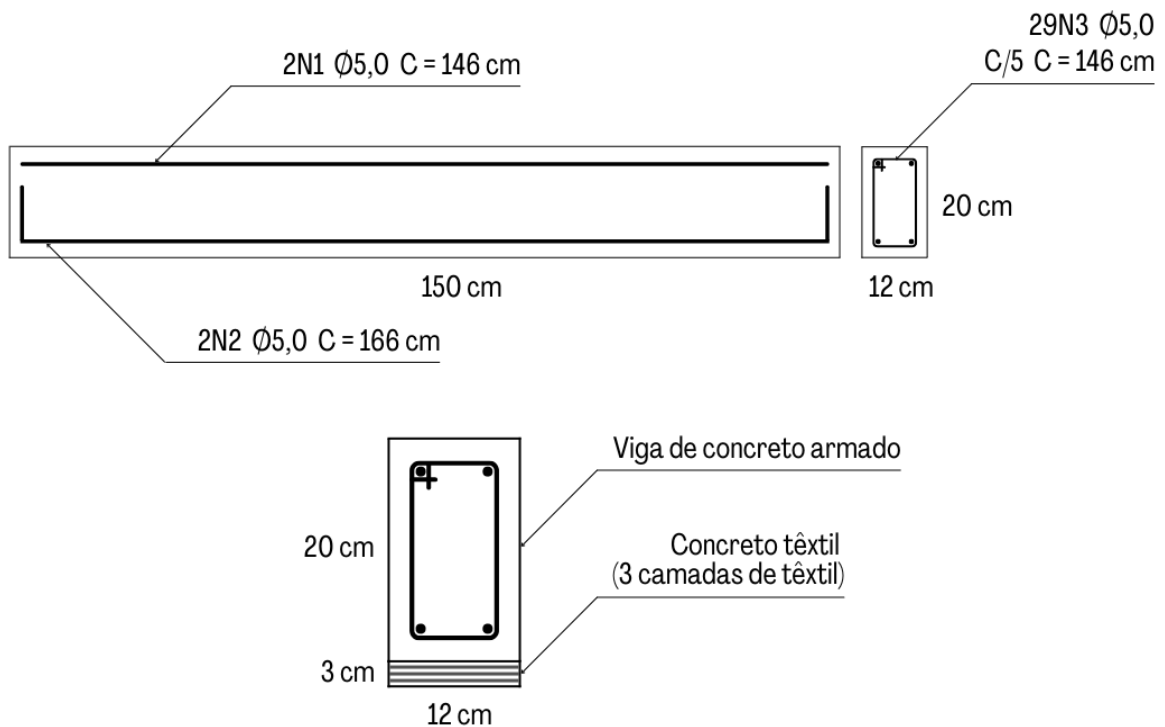


Figura 37 – Configuração das vigas antes e depois do reforço (Fonte: Autor)

3.4.2 Preparação e montagem das armaduras

As etapas de preparação, montagem e instrumentação das armaduras ocorreram no Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LEME/UFRGS). Inicialmente, as barras longitudinais foram marcadas com marcador permanente, com o propósito de garantir o correto posicionamento dos estribos e dos extensômetros, como apresentado na Figura 38.



Figura 38 – Marcação das barras longitudinais (Fonte: Autor)

Por conseguinte, como condição necessária para a fixação dos extensômetros, procedeu-se com a remoção das ranhuras no centro das armaduras positivas. O procedimento foi realizado com lima chata, de modo que a superfície das barras se apresentasse lisa e plana, como pode ser verificado na Figura 39.



Figura 39 – Lixamento das barras longitudinais (Fonte: Autor)

Finalizada a etapa de preparação, procedeu-se com a etapa de montagem. Para a armadura longitudinal tracionada empregou-se duas barras de aço CA-60 de 5,0 mm de diâmetro. Para a armadura de montagem, adotou-se a mesma configuração.

Para a armadura transversal, empregou-se 29 estribos de 5,0 mm de diâmetro, distribuídos uniformemente a cada 5,0 cm, à exceção das extremidades, cuja distância da face externa do gancho da armadura positiva é de 4,0 cm. Para a amarração dos estribos, utilizou-se arame recozido BWG18 de 1,2 mm e alicate de corte.

Após a montagem de todas as vigas (Figuras 40 e 41), procedeu-se com a instalação dos extensômetros na face inferior das barras positivas, conforme detalhado no item 3.7.



Figura 40 – Montagem das vigas (Fonte: Autor)



Figura 41 – Finalização do processo de montagem (Fonte: Autor)

3.4.3 Traço do concreto

Todas as vigas foram moldadas com concreto de uma única dosagem, de acordo com o traço apresentado na Tabela 18. A desforma das vigas ocorreu 48 horas após a concretagem. Dados relacionados à umidade dos agregados não foram fornecidos pela empresa.

<i>Traço</i>					
<i>Cimento</i>	<i>Areia fina</i>	<i>Areia</i>	<i>Brita 0</i>	<i>Água</i>	<i>Aditivo</i>
270 kg	250 kg	922 kg	778 kg	178 L	0,5 L
Tipo de cimento: CP V-ARI RS					
Tipo de aditivo: Advacast 518					
Slump: 160 mm					

Tabela 18 – Dados da concretagem (Fonte: Autor)

Para a caracterização do concreto, realizou-se ensaio de resistência à compressão simples dos corpos de prova, de acordo com as recomendações da NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos (ABNT, 2018) e do módulo de elasticidade

estático, conforme a NBR 8522: Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação Parte 1: Módulos estáticos à compressão (ABNT, 2021). Os corpos de prova foram moldados de acordo com as recomendações da NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova (ABNT, 2016). Imagens da moldagem dos corpos de prova e do posicionamento das armaduras podem ser verificadas nas Figuras 42 e 43.



Figura 42 – Moldagem dos corpos de prova cilíndricos (Fonte: Autor)



Figura 43 – Preparação para a concretagem (Fonte: Autor)

Conforme descrito em 4.1.1 e 4.1.2, os ensaios de caracterização do concreto foram realizados com as vigas na idade de 269 dias. Verificou-se que a resistência à compressão média dos corpos de prova foi de 32,55 MPa e o módulo de elasticidade estático médio foi de 29,39 GPa.

3.4.4 Armazenamento

As vigas foram entregues no LEME/UFRGS no dia 18 de fevereiro de 2022, 25 dias após a concretagem. Devido às dimensões do caminhão Munck, as vigas foram descarregadas na área de estacionamento e transportadas até o interior do Prédio Anexo, próximo do Laboratório, onde permaneceram armazenadas até a etapa de preparação do substrato. Posterior à desforma, os corpos de prova foram acondicionados sob as mesmas condições, sobre peças retangulares de madeira de 5,0 cm de altura, como apresentado na Figura 45.



Figura 44 – Acondicionamento das vigas e dos corpos de prova (Fonte: Autor)

3.5 PREPARAÇÃO DO SUBSTRATO

Como verificado na literatura, o aumento da rugosidade superficial do concreto é essencial para que ocorra aderência na interface matriz-substrato. Em vista disso, observou-se que a técnica de jateamento se mostrou eficaz, uma vez que remove a superfície menos resistente do concreto e promove a abertura imediata dos poros.

De acordo com os resultados obtidos nas investigações experimentais de Dalazen (2021) e Giese (2019), optou-se pelo jateamento com granalhas de aço do tipo G80, de diâmetro médio de 0,3 mm. Devido às questões de segurança, optou-se pelo jateamento executado por empresa especializada. Desse modo, as vigas foram transportadas pela UFRGS até a empresa contratada e entregues no LEME após o procedimento. Na data do jateamento, as vigas encontravam-se com 220 dias.

Quanto ao procedimento, determinou-se que o jateamento fosse aplicado diagonalmente, em ângulos próximos a 45°, a 1,5 m de distância da superfície de concreto. A área a ser jateada

foi delimitada previamente, sendo mantida íntegra a região dos apoios, como pode ser visto nas Figuras 45 e 46.

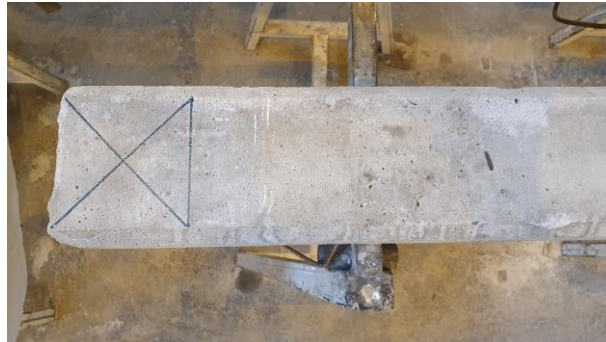


Figura 45 – Delimitação da área dos apoios (sem jateamento) (Fonte: Autor)



Figura 46 – Superfície jateada das vigas (Fonte: Autor)

A superfície do substrato, após o tratamento, pode ser vista na Figura 47. Apesar de pequenas variações de rugosidade, verificou-se a remoção da nata de cimento, ao passo que os se encontravam-se agregados expostos, tornando a superfície rugosa e adequada para a aplicação do reforço.



Figura 47 – Rugosidade promovida ao substrato (Fonte: Autor)

3.6 PREPARAÇÃO DO TÊXTIL

Para o corte das tiras de têxtil, utilizou-se uma tesoura de chapa de aço, uma vez que o material é fornecido em rolos de 50 m², conforme pode visto na Figura 48 (a). De acordo com as dimensões da viga, as tiras do têxtil de fibra de vidro AR foram cortadas com 11 cm de largura e 1,3 m de comprimento. Nessas dimensões, as tiras comportaram 8 fios de urdume, como mostrado na Figura 48 (b).

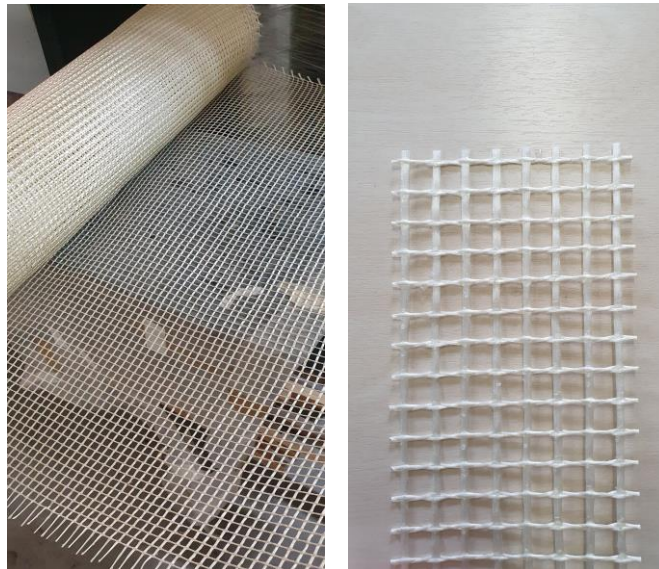


Figura 48 – Rolo (a) e tiras (b) de têxtil de fibra de vidro AR (Fonte: Autor)

Antes da aplicação do revestimento de resina epóxi, revestiu-se com fita crepe o trecho do urdume em que, posteriormente, seria instalado o extensômetro, como mostrado na Figura 49. Por conseguinte, parte das tiras foi revestida com resina epóxi e parte com resina epóxi seguida de areia, como pode ser visto nas Figuras 50, 51, 52 e 53.

Inicialmente, fez-se a aplicação da resina com pincel, porém, houve perda significativa de material através da malha. Por conseguinte, dada a consistência da resina, preferiu-se realizar a aplicação do material com a ajuda de uma esponja, com intervalo mínimo de 24 horas para a aplicação na outra face do têxtil. Ao final do procedimento, verificou-se o consumo de 1 kg de resina para 0,9 m² de têxtil, aproximadamente.

Para as tiras revestidas com epóxi e areia, polvilhou-se com uma colher de pedreiro cerca de 500 g de areia sobre cada face do têxtil no instante subsequente à aplicação da resina. O procedimento foi realizado alguns dias antes da produção do concreto têxtil.



Figura 49 – Proteção do local de instalação do extensômetro (Fonte: Autor)



Figura 50 – Execução do revestimento de epóxi (Fonte: Autor)



Figura 51 – Execução do revestimento de areia (Fonte: Autor)

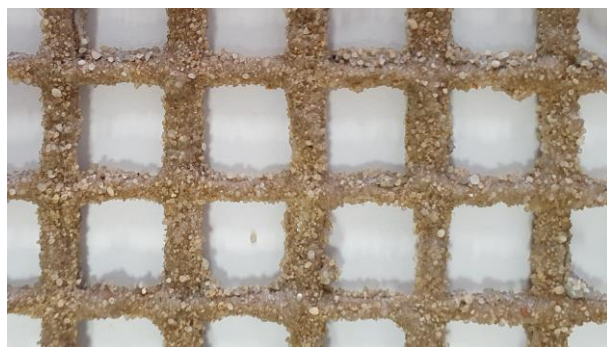


Figura 52 – Detalhe do revestimento de epóxi e areia (Fonte: Autor)

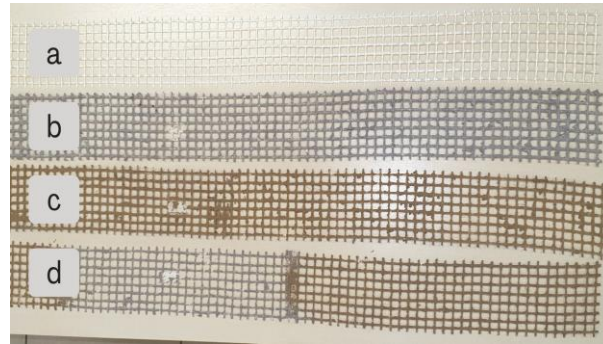


Figura 53 – Tiras de têxtil sem revestimento (a), revestidas com epóxi (b), com epóxi e areia (c) e com epóxi e areia parcial (nas extremidades) (d) (Fonte: Autor)

Devido à execução manual, verificou-se que a quantidade de resina e areia variou de tira para tira. Por este motivo, com o objetivo de analisar possíveis diferenças nos resultados e a influência da presença do revestimento na capacidade resistente da viga reforçada, verificou-se a massa de cada tira têxtil individualmente. Os resultados são apresentados na Tabela 19.

Viga	Tipo de revestimento	Massa das tiras (g)			
		Tira 1	Tira 2	Tira 3	Média (g)
1	Sem revestimento	60,1	59,3	61,4	60,3
2	Epóxi	206,0	200,0	239,5	215,2
3	Epóxi	221,1	186,8	261,5	223,1
4	Epóxi e areia	396,7	402,1	377,2	392,0
5	Epóxi e areia	375,5	390,1	331,8	365,8
6	Epóxi e parcial de areia	338,3	329,8	325,1	331,1
7	Epóxi e parcial de areia	393,2	353,2	305,6	350,7
8	Sem revestimento	60,9	60,3	59,0	60,1
9	Epóxi	264,9	241,7	163,8	223,5
10	Epóxi	256,5	184,7	255,1	232,1
11	Epóxi e areia	446,7	414,5	298,3	386,5
12	Epóxi e areia	303,7	312,7	323,0	313,1
13	Epóxi e parcial de areia	341,1	315,1	321,4	325,9
14	Epóxi e parcial de areia	323,2	370,8	340,1	344,7

Tabela 19 – Massa das tiras após a aplicação do revestimento (Fonte: Autor)

3.7 INSTRUMENTAÇÃO

Durante o ensaio de flexão a 4 pontos, todas as vigas tiveram sua deflexão medida com uso de transdutores de deslocamento variável linear (*Linear Variable Displacement Transducer*,

LVDT). Além disso, todas as vigas também foram instrumentadas com extensômetros (*strain gages*, SG) fixos no aço, têxtil e concreto.

Transdutores de deslocamento variável linear são dispositivos eletromecânicos capazes de converter o movimento retilíneo do objeto ao qual está acoplado mecanicamente em uma resposta elétrica correspondente. De modo similar, os extensômetros são dispositivos largamente utilizados para medir deformações em diferentes elementos estruturais. De tamanho diminuto e extremamente leves, possuem alta precisão de medição. Fixos nas estruturas, são capazes de converter deformação em variação da resistência elétrica, amplificando-a para leitura por sistema de medição.

Existem diferentes tipos e fabricantes de extensômetros, de modo que a escolha do dispositivo mais adequado varia de acordo com o tipo e a geometria do material, o nível de deformação a ser medido, a temperatura em que o monitoramento será realizado, entre outros fatores. Os extensômetros da marca Kyowa obedecem ao padrão de nomenclatura mostrado na Figura 54.

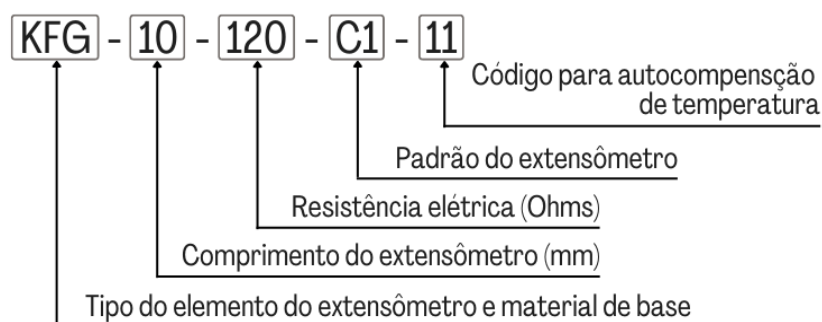


Figura 54 – Simbologia dos extensômetros da marca Kyowa (Fonte: Autor)

3.7.1 Instrumentação do aço

Para a medição da deformação específica das armaduras positivas, instalou-se extensômetros da marca Kyowa, tipo KFG-10-120-C1-11, de 10 mm de comprimento, resistência de 120 ohms e fator de calibração de 2,11.

O procedimento de instalação iniciou-se com a limpeza da área com algodão e álcool isopropílico. Por conseguinte, posicionou-se o extensômetro sobre a barra com auxílio de fita adesiva, fixando-o, posteriormente, com adesivo instantâneo de contato. Após a fixação do extensômetro, removeu-se cuidadosamente a fita adesiva com a ajuda de uma pinça, como pode ser visto nas Figuras 55 e 56.

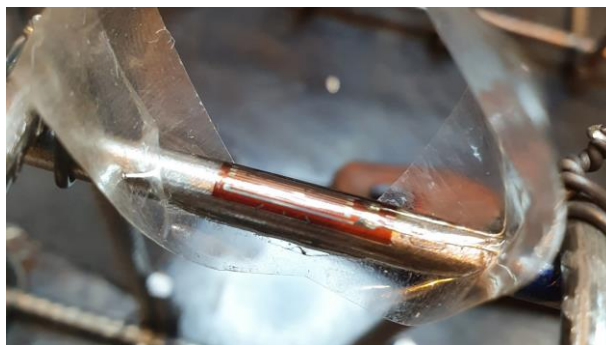


Figura 55 – Posicionamento do extensômetro com fita adesiva (Fonte: Autor)

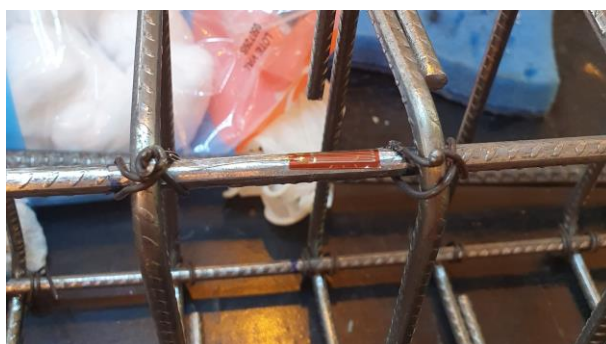


Figura 56 – Fixação do extensômetro com cola de contato (Fonte: Autor)

Após a fixação do extensômetro, procurou-se isolar o contato dos fios com a barra de aço por meio de fita isolante. Na sequência, fixou-se o cabo para transmissão de dados na face lateral dos estribos, a fim de garantir sua imobilidade, e soldou-o com estanho junto aos fios do extensômetro, conforme apresentado na Figura 57.

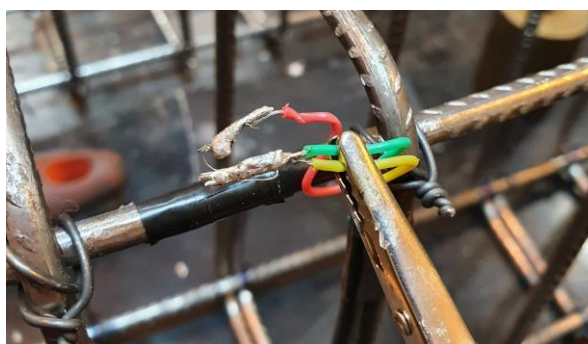


Figura 57 – Instalação do cabo para transmissão de dados (Fonte: Autor)

Posteriormente à soldagem, os fios foram isolados entre si, de modo a evitar curtos-circuitos, como mostrado na Figura 58. Para proteção do extensômetro, utilizou-se fita de auto fusão, aplicada sobre uma camada de selante de poliuretano, como mostrado nas Figuras 59 e 60. A

combinação dessas camadas faz com que o sensor não se desloque ao passo que impede o contato com o concreto.



Figura 58 – Isolamento entre os fios do extensômetro (Fonte: Autor)

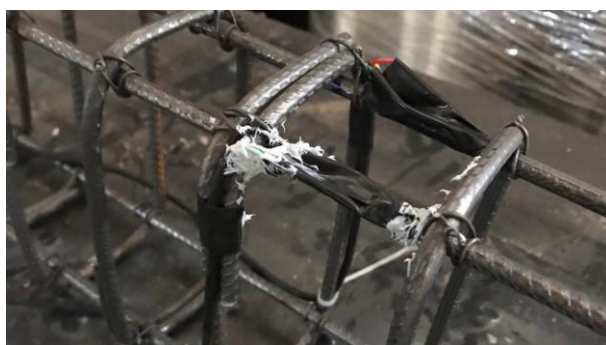


Figura 59 – Aplicação de selante de poliuretano (Fonte: Autor)

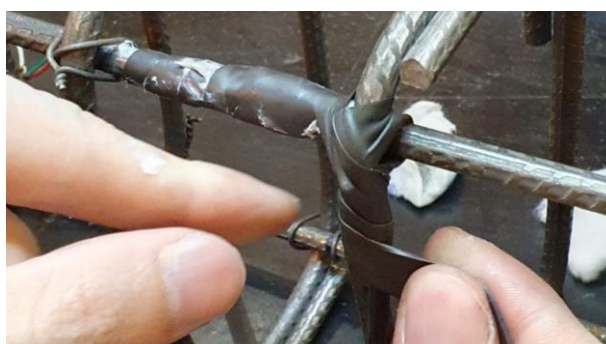


Figura 60 – Revestimento com fita de auto fusão (Fonte: Autor)

Além disso, alguns cuidados adicionais foram tomados para proteger os terminais dos cabos durante as etapas de transporte e concretagem. Primeiro, reforçou-se a fixação lateral dos cabos com massa plástica. Por conseguinte, fixou-se as extremidades dos cabos com o auxílio de uma haste metálica disposta verticalmente. A solução foi adotada para impedir que os terminais dos cabos pudessem ficar soltos, e entrar em contato com o concreto. Para finalizar,

os terminais dos cabos foram estanhados e envolvidos por sacos plásticos, como mostrado nas Figuras 61 e 62.



Figura 61 – Proteção dos terminais dos cabos (Fonte: Autor)



Figura 62 – Fixação da haste metálica (Fonte: Autor)

3.7.2 Instrumentação do concreto

Para medir a deformação específica do concreto, utilizou-se extensômetros da marca Kyowa, tipo KFG-20-120-C1-11, com comprimento de 20 mm e largura de 5 mm, resistência de 120 ohms e fator de calibração de 2,11, fixados no centro da face superior de todas as vigas.

O processo de instrumentação das vigas iniciou-se com a delimitação do local de fixação do extensômetro e a preparação da superfície superior do substrato, como mostrado nas Figuras 63 e 64. Devido à presença dos cabos de instrumentação do aço, a fixação do extensômetro

ocorreu no centro da viga a 20 cm de um dos pontos de aplicação de carga. Com auxílio de uma micro retífica, removeu-se a camada superficial de concreto, de modo que os agregados fossem expostos. Para a limpeza, utilizou-se álcool isopropílico.



Figura 63 – Marcação da viga para instrumentação (Fonte: Autor)

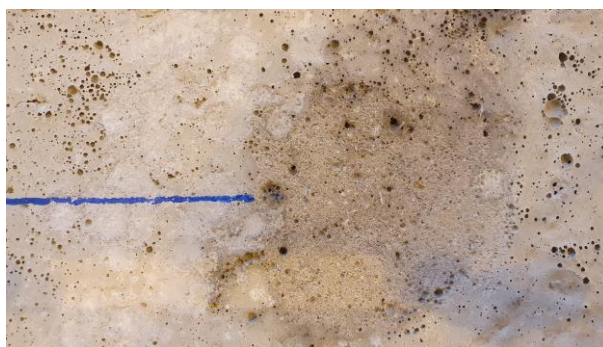


Figura 64 – Remoção da camada superficial de concreto (Fonte: Autor)

A fim de se obter uma superfície lisa e, perfeitamente aderida ao concreto, uniformizou-se a região com adesivo plástico. Após o tempo de secagem de 2 horas, lixou-se a região com lixas nº 50 e nº 100, como apresentado na Figura 65. Posteriormente, posicionou-se o sensor cuidadosamente com fita adesiva e adesivo instantâneo de secagem rápida (Figura 66).



Figura 65 – Uniformização da superfície de concreto (Fonte: Autor)

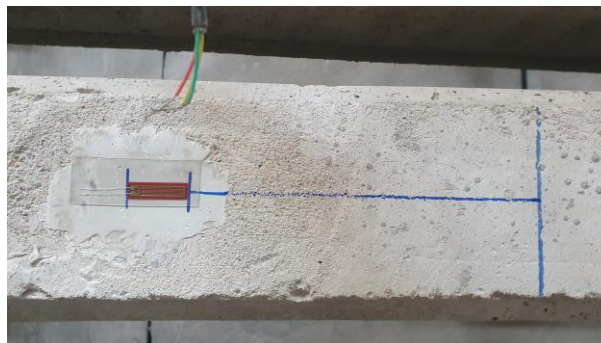


Figura 66 – Fixação do extensômetro na superfície da viga (Fonte: Autor)

Finalizada à etapa de fixação, soldou-se os fios do extensômetro ao conector do sistema de aquisição de dados e estanhou-se a extremidade livre dos cabos, como pode ser visto na Figuras 67 e 68. Por conseguinte, para proteger o extensômetro e evitar a ruptura da ligação, empregou-se fita isolante e uma camada de massa adesiva plástica, como mostrado na Figura 69.

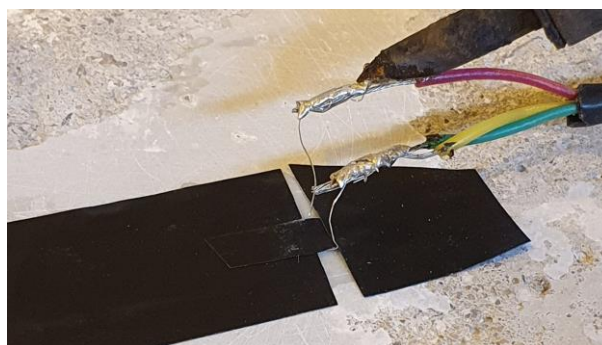


Figura 67 – Soldagem do extensômetro no cabo de aquisição de dados (Fonte: Autor)

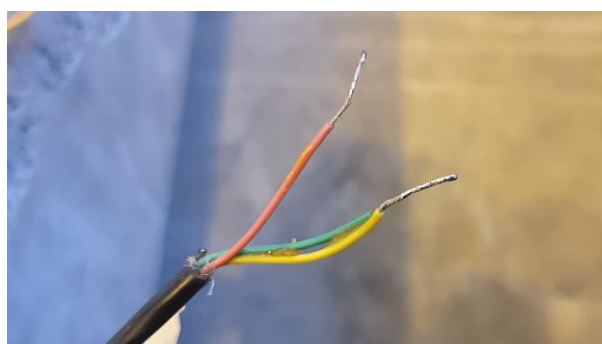


Figura 68 – Revestimento da extremidade livre do cabo de dados com estanho (Fonte: Autor)



Figura 69 – Proteção do extensômetro com adesivo plástico (Fonte: Autor)

3.7.3 Instrumentação do têxtil

Para medir a deformação específica do têxtil utilizou-se extensômetros da marca Kyowa do tipo KFRP-5-120-C1-3, com comprimento de 5 mm e largura de 1,4 mm, resistência de 120 ohms, fator de calibração de 2,09, fixados no urdume central da última camada.

O processo de instrumentação do têxtil iniciou-se com a delimitação do local de instalação e preparação da superfície do urdume. Devido à abertura insuficiente da malha e à presença do revestimento, fez-se necessário romper um fio de trama de modo que houvesse espaço livre suficiente para a fixação do extensômetro, como pode ser visto na Figura 70.



Figura 70 – Rompimento do fio de trama para fixação do extensômetro (Fonte: Autor)

Para garantir a uniformidade da superfície, removeu-se cuidadosamente os resquícios de resina e limpou-a com álcool isopropílico. Para a fixação do extensômetro, utilizou-se fita adesiva e adesivo de contato instantâneo para superfícies flexíveis, como mostrado na Figura 71. Por conseguinte, o extensômetro foi envolvido e protegido por fita isolante.

Desejando-se minimizar qualquer interferência possível no desempenho do têxtil, devido à instalação do extensômetro, utilizou-se fios de cobre revestidos como ponte para instalação

dos cabos de transmissão de dados. Posteriormente, posicionou-se os fios próximos ao têxtil e soldou-os ao extensômetro com estanho, como pode ser visto na Figura 72.



Figura 71 – Fixação do extensômetro na superfície do têxtil (Fonte: Autor)

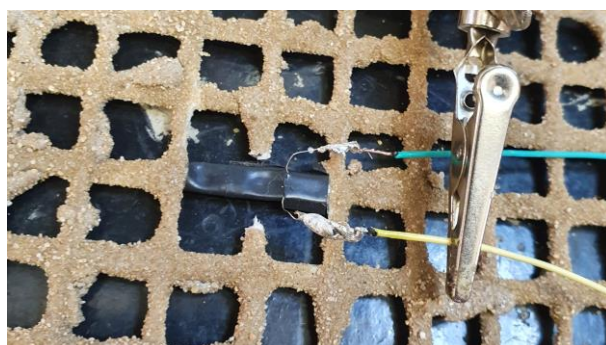


Figura 72 – Ponte de ligação entre o extensômetro e o cabo de dados (Fonte: Autor)

Para evitar a ruptura da ligação, protegeu-se a solda e os fios com fita isolante e adesivo de silicone transparente, como mostrado na Figura 73. As extremidades livres dos fios também foram estanhadas para serem conectadas ao cabo de transmissão de dados. Com a viga reforçada, os cabos soldados ao têxtil foram fixados com massa plástica na face lateral da viga, como mostrado na Figura 74.

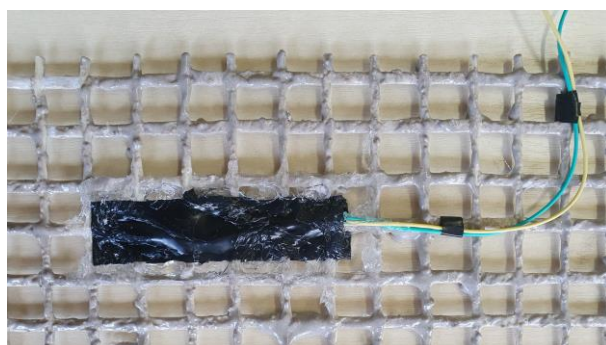


Figura 73 – Proteção do extensômetro com fita isolante e adesivo de silicone (Fonte: Autor)

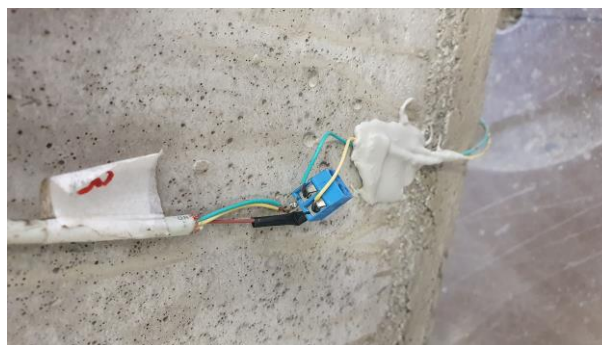


Figura 74 – Proteção da instalação do extensômetro fixado ao têxtil (Fonte: Autor)

3.8 EXECUÇÃO DOS REFORÇOS

São apresentados e descritos os processos de reforço para ambas as matrizes, com ênfase nas particularidades de cada método, laminação ou moldagem. Todas as matrizes foram produzidas pelo mesmo operador, utilizando o mesmo equipamento. Para facilitar a execução do procedimento, os reforços foram realizados com as vigas na posição usual de laboratório, ou seja, com as armaduras positivas para cima. Além disso, todos os reforços foram realizados em temperatura ambiente.

Quanto à espessura das camadas, buscou-se referências na literatura, em pesquisas nacionais e internacionais. Deste modo, a espessura inicial seguiu o valor mínimo de 6 mm, sugerido pela ficha técnica da argamassa industrializada (MC-BAUCHEMIE BRASIL, 2020). Após alguns testes, contudo, verificou-se que este valor se mostrou insuficiente para recobrir os têxteis revestidos com resina epóxi e areia. Desta forma, procurou-se aumentar a espessura da camada até que fosse possível realizar a cobertura completa do têxtil. Por fim, decidiu-se empregar a medida de 10 mm em todos os casos.

3.8.1 Reforço dos lotes 1 e 2

O reforço dos lotes 1 e 2 ocorreu em dias subsequentes, em condições similares de umidade e temperatura. Na data do reforço, as vigas dos lotes 1 e 2 encontravam-se com 235 e 236 dias, respectivamente. Para a preparação da matriz 1, utilizou-se uma amassadeira espiral da marca Metvisa com capacidade para 12 L, apresentada na Figura 75. O procedimento seguiu rigorosamente as recomendações do fabricante, respeitando-se o tempo de 5 minutos, contados a partir da mistura completa dos componentes.



Figura 75 – Equipamento empregado para a produção das matrizes de reforço (Fonte: Autor)

A fim de garantir melhor trabalhabilidade, adicionou-se água na proporção do limite superior indicado pela empresa fabricante, de 3,5 L para 25 kg de argamassa industrializada, correspondente a relação água/aglomerante de 0,14.

Para a conformação da matriz, utilizou-se contenções laterais móveis de madeira compensada, fixadas sob pressão por grampos metálicos. Para as extremidades, empregou-se contenções menores, fixadas sob pressão por blocos de madeira maciça e grampos sargento. Para o controle de altura das camadas, fez-se o uso de sarrafos de madeira de 1 cm de espessura e 1,3 m de comprimento.

A fim de se evitar a perda indesejável de material ou vazamento da mistura, devido à presença de chanfros nas laterais das vigas, como mostrado na Figura 76, fez-se necessário o uso de recortes de etileno-acetato de vinila (EVA), que foram posicionados nas extremidades internas das formas, como pode ser verificado nas Figuras 77 e 78. Além disso, devido ao tempo de trabalhabilidade da argamassa ser de 15 minutos, procurou-se instalar previamente as formas em todas as vigas do seu respectivo lote, uma vez que se teve que realizar as misturas e os reforços individualmente.



Figura 76 – Chanfros nas extremidades das vigas (Fonte: Autor)



Figura 77 – Recorte de etileno-acetato de vinila (EVA) (Fonte: Autor)



Figura 78 – Contenção lateral da forma (Fonte: Autor)

Devido a esta limitação e o grande número de corpos de prova necessários para a caracterização das misturas isoladas, decidiu-se realizar uma moldagem prévia de 9 corpos de prova cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura para serem rompidos nas idades de 7, 14 e 28 dias. Adicionalmente, para controle de qualidade, retirou-se amostras de cada mistura para moldagem de 2 corpos de prova para serem rompidos na idade de 28 dias, e comparados com os corpos de prova da moldagem de caracterização das matrizes. Diferentes destes que foram mantidos em câmara úmida até a ruptura, os corpos de prova de controle foram curados junto às vigas. Detalhes adicionais e resultados são apresentados em 4.1.5.

Previamente à aplicação da primeira camada de argamassa, removeu-se a poeira da superfície jateada com uma brocha retangular média, e umedeceu-se o substrato até o estado saturado seco. De funcionamento simples, o processo de reforço iniciava-se com as formas elevadas em 1 cm, niveladas a partir da região dos apoios (por estarem íntegros, sem jateamento). Após a execução da respectiva camada, retiravam-se os grampos de fixação e subiam-se as formas laterais, de modo que um sarrafo pudesse ser inserido sob a base da forma (de ambos os lados). Por conseguinte, executava-se a segunda camada com espessura de 1 cm, repetindo-se o processo até que o terceiro nível fosse completado.

Importante ressaltar que, de acordo com os princípios da laminação, as etapas de produção do concreto têxtil compreendem o lançamento da matriz, o nivelamento da camada, a disposição e a compactação manual do reforço, e a uniformização com a camada de argamassa seguinte. À vista disso, procurou-se lançar argamassa suficiente para cobrir, aproximadamente, dois terços da espessura de cada camada de argamassa.

No momento subsequente, posicionou-se o reforço, e utilizou-se de uma peça retangular de madeira compensada para centralizar o têxtil no interior da camada, como pode ser visto na Figura 79. Por fim, cobriu-se o têxtil com argamassa até atingir o limite estabelecido pela forma, como mostrado na Figura 80.



Figura 79 – Posicionamento do têxtil no centro da sua respectiva camada (Fonte: Autor)



Figura 80 – Viga reforçada com três camadas de argamassa industrializada (Fonte: Autor)

Após a conclusão do reforço, cobriu-se as vigas com lonas plásticas (Figura 81). Devido a necessidade de reaproveitamento das contenções, a retirada das formas ocorreu 24 horas após a execução do reforço, como mostrado na Figura 82.



Figura 81 – Vigas reforçadas e protegidas por lona plástica (Fonte: Autor)



Figura 82 – Retirada das formas (Fonte: Autor)

3.8.2 Reforço dos lotes 3 e 4

Diferentemente dos lotes 1 e 2, o reforço das vigas dos lotes 3 e 4 não ocorreu em dias subsequentes. Na data do reforço, as vigas encontravam-se, respectivamente, com 259 e 268 dias.

Para a preparação da matriz 2, utilizou-se, também, a amassadeira espiral da empresa Metvisa. Para evitar a perda do material mais fino, todos os materiais secos foram adicionados na ordem do mais fino para o mais grosso (cimento, sílica ativa e areia). Primeiramente, os materiais secos foram misturados por 1 minuto. Por conseguinte, adicionou-se 90% da água e misturou-se por 2 minutos. Por fim, adicionou-se os 10% restantes da água com 100% do aditivo superplastificante, misturando-se por mais 3 minutos.

Para a conformação da matriz autoadensável, ao contrário das contenções empregadas no reforço das vigas dos lotes 1 e 2, utilizou-se formas laterais fixas de madeira compensada, fixadas sob pressão por grampos metálicos. O ajuste fez-se necessário, uma vez que a consistência fluída da mistura poderia escorrer durante a movimentação das peças utilizadas

para o controle de espessura. Em vista disso, procurou-se criar uma forma graduada, que não precisasse ser removida durante a execução das camadas, como poder ser visto na Figura 83.

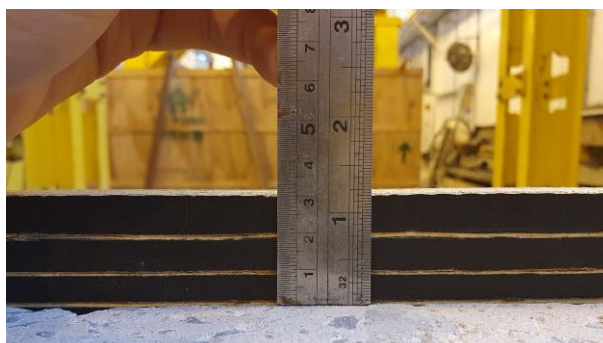


Figura 83 – Forma graduada fixa (Fonte: Autor)

Além disso, para garantir o correto espaçamento entre as tiras têxteis, empregou-se espaçadores confeccionados em cerâmica com 5 mm de espessura, aproximadamente, como mostrado na Figura 84. Entre camadas, procurou-se utilizar 6 espaçadores por camada, uniformemente distribuídos, de modo que os têxteis não cedessem com o lançamento da mistura, como pode ser visto na Figura 85.



Figura 84 – Espaçadores cerâmicos (Fonte: Autor)



Figura 85 – Posicionamento dos espaçadores (Fonte: Autor)

Neste sentido, verificou-se que, devido a maior rigidez dos têxteis revestidos, a mistura apresentou bom comportamento, fluindo adequadamente pelos reticulados. Para o têxtil sem revestimento, contudo, fez-se necessário executar uma camada de cada vez, pois, mesmo com um número maior de espaçadores, o têxtil se deformava com o peso da argamassa. Neste caso, o processo seguiu as etapas de posicionamento dos espaçadores e da tira têxtil e o lançamento da argamassa, e assim até que a terceira camada fosse finalizada, como mostrado na Figura 86.

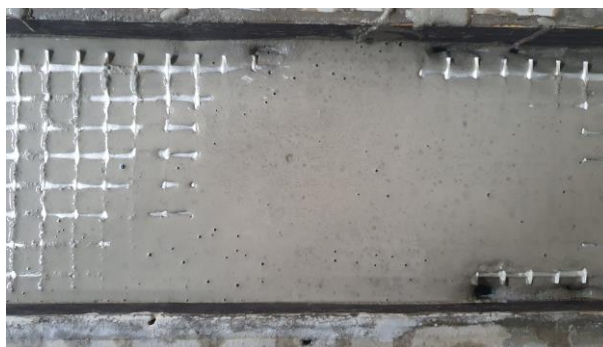


Figura 86 – Lançamento da matriz autoadensável (Fonte: Autor)

Outro ponto verificado antes do reforço com a matriz autoadensável diz respeito às imperfeições geométricas das vigas. Em diversos exemplares, verificou-se a existência de espaços entre a face lateral da viga e a forma, como pode ser visto na Figura 87. Para o reforço com a argamassa tixotrópica, as fendas não representam risco de perda de material, o que não se pode dizer da matriz autoadensável. Deste modo, para evitar o vazamento da mistura, adotou-se o escoramento externo de peças de madeira dispostas sobre tiras de PVA, como pode ser visto nas Figuras 88 e 89.



Figura 87 – Imperfeições geométricas das vigas (Fonte: Autor)



Figura 88 – Elementos do sistema de escoramento externo (Fonte: Autor)



Figura 89 – Escoramento externo (Fonte: Autor)

Do mesmo modo que as vigas dos lotes 1 e 2, as vigas dos lotes 3 e 4 foram reforçadas individualmente, tendo sido moldados corpos de prova de controle para todas as misturas. A desforma ocorreu após 72 horas, como mostrado nas Figuras 90 e 91.



Figura 90 – Vigas reforçadas com a matriz autoadensável (Fonte: Autor)



Figura 91 – Desforma das vigas dos lotes 3 e 4 (Fonte: Autor)

3.9 ENSAIO DE FLEXÃO A 4 PONTOS

Para avaliar o desempenho das vigas do programa experimental em relação à carga máxima resistida, realizou-se ensaios de flexão a 4 pontos em uma prensa servo-controlada com capacidade de 2000 kN, da empresa Shimadzu, conectada a um sistema de aquisição de dados universal. Para a coleta e leitura das informações, utilizou-se o equipamento QuantumX MX840A da empresa HBM e o *software* Catman Easy, versão 3.5.1.

Para o ensaio de flexão, empregou-se a taxa de carregamento de 1 mm/min, em concordância com as pesquisas de Giese (2019), Reginato (2020) e Dalazen (2021). Todas as vigas foram ensaiadas com duas cargas concentradas aplicadas em seus terços médios, como pode ser visto nas Figuras 92, 93 e 94. O acompanhamento do comportamento das vigas foi realizado a partir do monitoramento de cargas, deslocamentos e deformações específicas.

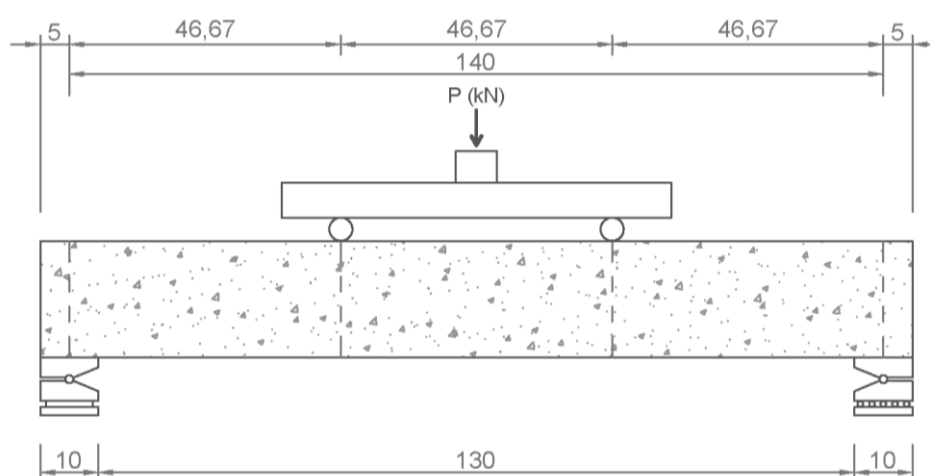


Figura 92 – Representação gráfica do ensaio de flexão a 4 pontos (Fonte: Autor)



Figura 93 – Representação real do ensaio de flexão a 4 pontos (Fonte: Autor)



Figura 94 – Viga posicionada para ensaio (Fonte: Autor)

Todas as vigas tiveram a deflexão medida na região central por 2 transdutores de deslocamento variável linear (LVDTs) da empresa HBM, com curso de $\pm 50,0$ mm e precisão de 0,01 mm, como mostrado na Figura 95. Para garantir a verticalidade dos leitores, utilizou-se de nível bolha. Além disso, para medir as deformações específicas dos materiais, empregou-se 4 extensômetros (SGs) da empresa Kyowa, fixos no aço (SG1 e SG2), têxtil (SG3) e concreto (SG4), como mostrado na Figura 96. Detalhes sobre a instrumentação podem ser verificados em 3.7.



Figura 95 – Sistema de aplicação de carga e posicionamento dos LVDTs (Fonte: Autor)

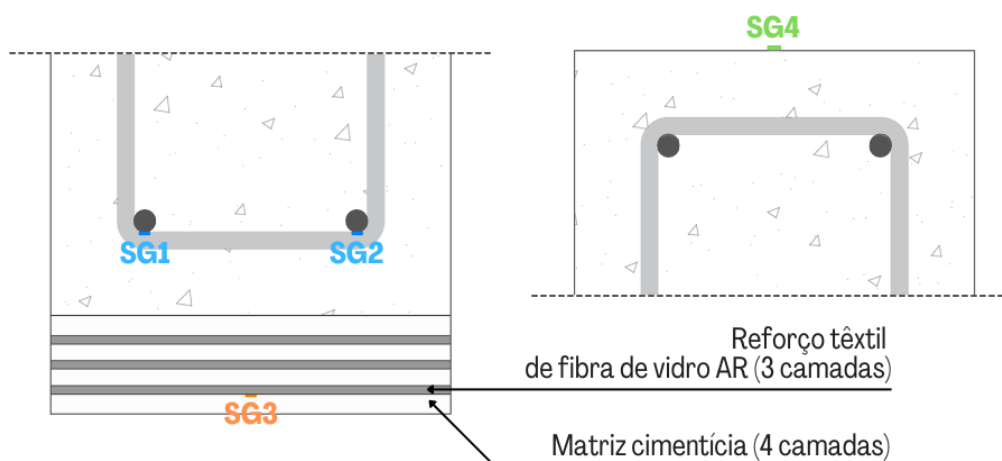


Figura 96 – Disposição dos extensômetros (Fonte: Autor)

Assim como para a execução dos reforços, realizou-se os ensaios de flexão por lotes (de 1 a 4). Tendo em vista a disponibilidade de equipamentos e operadores, somado à existência de feriados nacionais, fez-se necessário ajustar as datas em que os reforços seriam executados, a fim de que todos os ensaios fossem realizados aos 28 dias. A idade das vigas no dia do respectivo ensaio de flexão pode ser verificada na Tabela 20. Aos 263 dias, junto ao lote 1, rompeu-se a viga testemunho. Nos dias de ensaio, rompeu-se, também, os corpos de prova de controle das matrizes de reforço das respectivas vigas.

<i>Nº da viga</i>	<i>Código de referência</i>	<i>Lotes</i>	<i>Idade da viga</i>	<i>Idade do reforço</i>
1	M1-SR/V1			
2	M1-E-R1/V2	Lote 1	263 dias	28 dias
3	M1-E-R2/V3			
4	M1-EA-R1/V4			
5	M1-EA-R2/V5	Lote 2	268 dias	28 dias
6	M1-EAP-R1/V6			
7	M1-EAP-R2/V7			
8	M2-SR/V8			
9	M2-E-R1/V9	Lote 3	287 dias	28 dias
10	M2-E-R2/V10			
11	M2-EA-R1/V11			
12	M2-EA-R2/V12	Lote 4	294 dias	28 dias
13	M2-EAP-R1/V13			
14	M2-EAP-R2/V14			
15	VT/V15		263 dias	28 dias

Tabela 20 – Idade das vigas e dos reforços na data do ensaio de flexão (Fonte: Autor)

3.10 ANÁLISE TEÓRICA

Estruturas de concreto armado reforçadas à flexão atingem sua carga máxima imediatamente antes da ruptura ou da deformação plástica de um de seus componentes: aço, concreto ou material de reforço. No entanto, o aumento da capacidade resistente somente pode ser alcançado se os modos prematuros de ruptura (falhas de aderência ou colapso por cisalhamento) forem evitados.

O cálculo da resistência à flexão de uma viga reforçada pode ser realizado seguindo-se as diretrizes da NBR 6118 (ABNT, 2014). As equações que regem a análise do estado-limite último consideram, em geral, o equilíbrio, a compatibilidade de deformações e as leis constitutivas dos materiais.

Neste sentido, ressalta-se que o cálculo da carga máxima teórica é realizado sem a minoração dos parâmetros de resistência dos materiais e desconsiderando-se o efeito de carregamentos de longa duração e o efeito Rüschi, de modo que os resultados teóricos possam ser comparados diretamente com os valores obtidos nos ensaios experimentais. Logo, as distribuições de tensão e deformação em uma seção reforçada com concreto têxtil podem ser representadas conforme ilustrado na Figura 97.

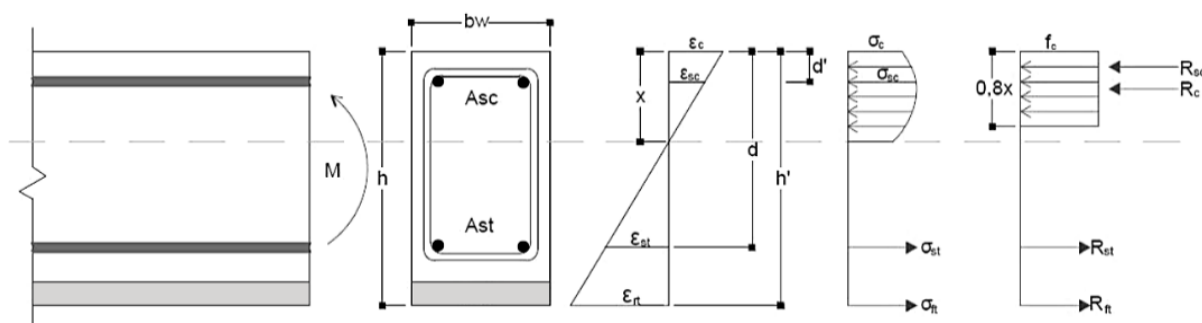


Figura 97 – Diagrama esquemático de equilíbrio de uma viga reforçada à flexão (Fonte: adaptado de BEBER, 2003)

O dimensionamento de vigas de concreto armado submetidas à flexão simples no ELU é feito quando a linha neutra está entre os limites dos domínios 2 e 3 ou entre os domínios 3 e 4. Os domínios de deformação representam as diversas possibilidades de ruína de uma seção de concreto armado. Peças subarmadas são aquelas que, por possuírem uma taxa de armadura muito pequena, rompem no domínio 2.

No domínio 2, a ruptura do elemento estrutural se caracteriza pela deformação plástica excessiva do aço enquanto o concreto não atinge a sua deformação máxima. Neste domínio, a deformação de alongamento (ε_{sd}) na armadura tracionada (A_s) é fixa e igual a 10‰, e a deformação de encurtamento (ε_{cd}) na fibra mais comprimida de concreto varia entre zero e ε_{cu} , sendo que, para os concretos do grupo I de resistência ($f_{ck} \leq 50$ MPa), ε_{cu} assume o valor de 3,5‰. Sob a deformação de 10‰, a tensão na armadura corresponde à máxima permitida no aço (f_{yd}). O tipo de ruptura é dúctil (ruptura com aviso prévio), em virtude da intensa fissuração que precede a ruptura.

Para se determinar a capacidade resistente de uma viga de concreto armado reforçada à flexão com concreto têxtil deve-se, obrigatoriamente, verificar a seção transversal tanto para os modos de ruptura clássicos quanto para a possibilidade de falha prematura nas interfaces de ligação entre os materiais. Logo, os procedimentos de cálculo são, necessariamente, iterativos e a implementação computacional é recomendada. Logo, com base nas recomendações da NBR 6118 (ABNT, 2014), definiram-se as seguintes hipóteses básicas:

- a) As seções transversais permanecem planas após a deformação;
- b) A deformação específica máxima do concreto é 3,5‰;
- c) A deformação específica máxima da armadura de tração é 10‰;
- d) A resistência à tração do concreto é desprezada;
- e) Existe aderência perfeita entre o aço e o concreto;
- f) Existe aderência perfeita entre o têxtil e a matriz;
- g) Existe aderência perfeita entre a matriz e o substrato;
- h) A tensão de tração nas armaduras é obtida a partir dos diagramas tensão-deformação;
- i) A distribuição de tensões no concreto, realizada de acordo com o diagrama parábola-retângulo, é substituído por um retângulo com profundidade $y = \lambda x$, onde o parâmetro λ é igual a 0,8 para concretos de $f_{ck} \leq 50$ MPa.

Definidas as hipóteses, pode-se escrever as expressões que definem a posição da linha neutra, as deformações específicas e as equações de equilíbrio para a seção transversal do elemento

reforçado. Através da equação de equilíbrio das forças, determina-se a posição da linha neutra, conforme apresentado nas Equações 1 e 2:

$$\sigma_s' A_s' + 0,8 b_w f_c x = \sigma_s A_s + \sigma_f A_f \quad \text{Equação 1}$$

$$x = \frac{\sigma_s A_s + \sigma_f A_f - \sigma_s' A_s'}{0,8 b_w f_c} \quad \text{Equação 2}$$

Sendo,

A_s' : Área da seção transversal da armadura longitudinal comprimida;

A_s : Área da seção transversal da armadura longitudinal tracionada;

A_f : Área da seção transversal do reforço têxtil;

σ_s' : Tensão na armadura longitudinal comprimida;

σ_s : Tensão na armadura longitudinal tracionada;

σ_f : Tensão no reforço têxtil.

Para o cálculo da carga de ruptura teórica, procede-se de acordo com o método iterativo sugerido por Beber (2003), na forma de fluxograma (Figura 98). Para a estimativa inicial da linha neutra “x”, empregou-se as tensões máximas teóricas resistidas pelos materiais.

Por conseguinte, de acordo com os valores limites determinados pela NBR 6118 (ABNT, 2014), verifica-se o domínio de deformação referente à posição da linha neutra (Equações 3, 4 e 5).

$$\text{Se } x \leq 0,259d = \frac{0,0035d}{0,0035 + 0,010} \rightarrow \text{domínio 2} \quad \text{Equação 3}$$

$$\text{Se } 0,259d < x \leq 0,510d = \frac{0,0035d}{0,0035 + \varepsilon_y} \rightarrow \text{domínio 3} \quad \text{Equação 4}$$

$$\text{Se } 0,510d < x \rightarrow \text{domínio 4} \quad \text{Equação 5}$$

Sendo,

x : Posição da linha neutra;

d : Distância entre a fibra mais comprimida e o centroide da armadura longitudinal tracionada;

ε_y : Deformação específica do aço;

Conhecida a posição da linha neutra e o domínio de deformação, estabelecem-se os valores das deformações específicas no concreto, nas armaduras (comprimida e tracionada) e no têxtil através das Equações 6, 7, 8, e 9.

$$\frac{\varepsilon_c}{x} = \frac{\varepsilon_s}{d-x} \rightarrow \varepsilon_c = \left(\frac{x}{d-x}\right)\varepsilon_s \quad \text{Equação 6}$$

$$\frac{\varepsilon_s}{d-x} = \frac{\varepsilon_s'}{x-d'} \rightarrow \varepsilon_s' = \left(\frac{x-d'}{d-x}\right)\varepsilon_s \quad \text{Equação 7}$$

$$\frac{\varepsilon_c}{x} = \frac{\varepsilon_s}{d-x} \rightarrow \varepsilon_s = \left(\frac{d-x}{x}\right)\varepsilon_c \quad \text{Equação 8}$$

$$\frac{\varepsilon_s}{d-x} = \frac{\varepsilon_f}{d_f-x} \rightarrow \varepsilon_f = \left(\frac{d_f-x}{d-x}\right)\varepsilon_s \quad \text{Equação 9}$$

Sendo,

ε_c : Deformação específica do concreto;

ε_s : Deformação específica da armadura longitudinal tracionada;

ε_s' : Deformação específica da armadura longitudinal comprimida;

d' : Distância entre a fibra mais comprimida e o centroide da armadura longitudinal comprimida;

d_f : Distância entre a fibra mais comprimida e o centroide do reforço de concreto têxtil.

Determinado o valor da posição da linha neutra, calcula-se, por equilíbrio das forças, o momento da seção transversal e a carga aplicada, conforme a Equação 10. Por conseguinte, inicia-se o processo iterativo até a convergência do valor da linha neutra e do momento máximo.

$$M_u = \sigma_s A_s d + \sigma_f A_f d_f - 0,32 b_w f_c x^2 - \sigma_s' A_s' d' \quad \text{Equação 10}$$

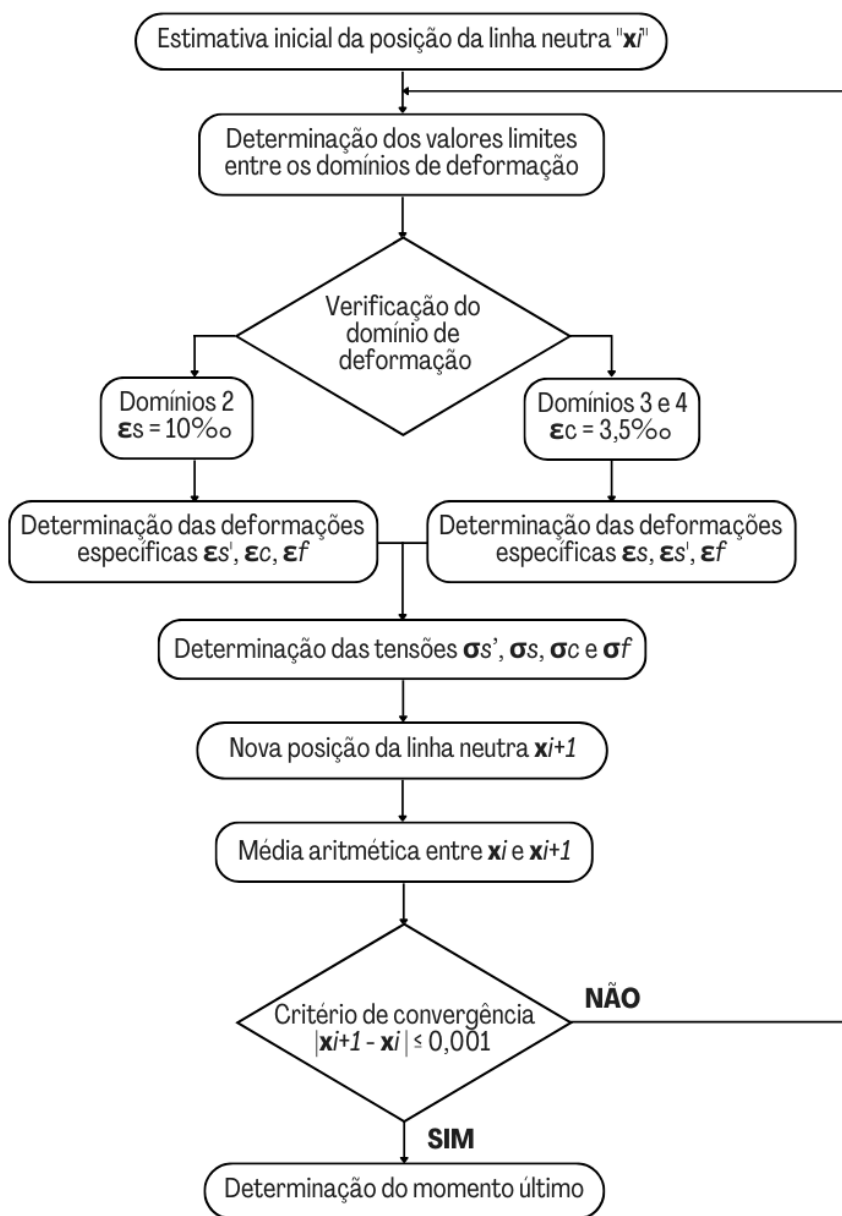


Figura 98 – Fluxograma de cálculo iterativo da capacidade resistente à flexão (Fonte: Adaptado de Beber, 2003)

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os ensaios e os resultados obtidos ao longo do programa experimental. Inicialmente, são descritos os procedimentos de caracterização dos materiais empregados, necessários para a análise de resultados. Por conseguinte, são apresentados e descritos os ensaios de flexão, onde os resultados teóricos são comparados aos experimentais.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

São descritos os ensaios de caracterização dos materiais empregados na pesquisa, tanto para a produção das vigas quanto para a do concreto têxtil. Todos os ensaios foram realizados em uma prensa servo-hidráulica da empresa Shimadzu, com capacidade máxima de 2000 kN.

4.1.1 Resistência à compressão do concreto

Com o objetivo de avaliar o comportamento do concreto têxtil, ao ser aplicado como reforço de estruturas em condições semelhantes às encontradas em áreas urbanas, decidiu-se trabalhar com vigas de resistência característica à compressão igual a 25 MPa. Deste modo, moldou-se corpos de prova de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura que foram utilizados para a caracterização do material.

De acordo com empresa contratante, a moldagem dos corpos de prova seguiu as recomendações normativas da NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova (ABNT, 2016). Para a caracterização do concreto, realizou-se o ensaio de resistência à compressão simples dos corpos de prova, de acordo com as recomendações da NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos (ABNT, 2018).

Antes do ensaio, as bases dos corpos de prova foram retificadas em uma retífica equipada com lixa rotativa e água, como exibido na Figura 99. Para o ensaio, posicionou-se os corpos de prova sobre a mesa da prensa de modo que seu eixo coincida com o da máquina, como mostrado na Figura 100. O equipamento, então, aplicará um carregamento a uma velocidade constante de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s até que haja uma queda de força que indique a ruptura. Para

fins de caracterização, a determinação da resistência à compressão foi realizada em data próxima à do ensaio de flexão, aos 264 dias. Os resultados estão expressos na Tabela 21.



Figura 99 – Preparação dos corpos de prova (Fonte: Autor)



Figura 100 – Ensaio de resistência à compressão do concreto (Fonte: Autor)

<i>Nº do CP</i>	<i>Resistência à compressão (MPa)</i>
1	33,70
2	31,97
3	28,84
4	33,78
5	32,22
6	34,81
Média	32,55
Desvio padrão	2,10
Coef. de variação	6,47%

Tabela 21 – Resistência à compressão do concreto (Fonte: Autor)

4.1.2 Módulo de elasticidade estático do concreto

Para a determinação do módulo de elasticidade estático do concreto, seguiu-se as diretrizes da Metodologia A - Tensão fixa, descrita na NBR 8522: Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação (Parte 1): Módulos estáticos à compressão (ABNT, 2021). Realizou-se o ensaio em 3 corpos de prova na idade de 269 dias.

As deformações específicas foram medidas por meio de 2 transdutores de deslocamento variável linear (LVDTs) da empresa HBM, com curso de $\pm 1,00$ mm, precisão de 0,0001 mm. Para a coleta e leitura de dados, utilizou-se o equipamento QuantumX MX840A da empresa HBM e o *software* Catman Easy, versão 3.5.1. Imagens do ensaio podem ser vistas nas Figuras 101 e 102.



Figura 101 – Ensaio de módulo de elasticidade estático do concreto (Fonte: Autor)

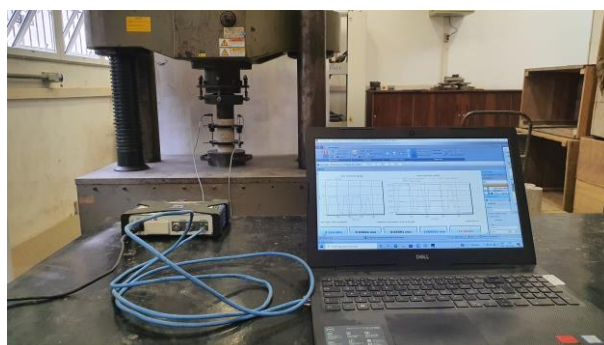


Figura 102 – Sistema para aquisição e leitura dos dados (Fonte: Autor)

Os resultados, a média e o desvio padrão do módulo de elasticidade estão apresentados na Tabela 22. Pelos valores encontrados, verifica-se que não há diferenças significativas entre os resultados do módulo de elasticidade estático dos corpos de prova de concreto.

<i>Nº do CP</i>	<i>Módulo de elasticidade (GPa)</i>
1	29,37
2	28,97
3	29,82
Média	29,39
Desvio padrão	0,42
Coef. de variação	1,44%

Tabela 22 – Módulo de elasticidade do concreto (Fonte: Autor)

4.1.3 Resistência à tração do aço

Para a confecção das vigas, empregou-se barras longitudinais e estribos de aço CA-60, ambos com diâmetros de 5,0 mm. Para a caracterização do aço, realizou-se o ensaio de resistência à tração em 3 barras de 73 cm de comprimento, observando-se as recomendações da NBR ISO 6892-1: Materiais metálicos - Ensaio de Tração - Parte 1 - Método de ensaio à temperatura ambiente (ABNT, 2018). Imagens do ensaio são mostradas nas Figuras 103, 104 e 105. Verificou-se a tensão média de escoamento de 738,48 MPa e a tensão média de ruptura de 768,72 MPa, como mostrado na Tabela 23.



Figura 103 – Barras de aço CA-60 ensaiadas à tração (Fonte: Autor)



Figura 104 – Ensaio de resistência à tração do aço (Fonte: Autor)



Figura 105 – Ruptura da barra (Fonte: Autor)

<i>Barra</i>	<i>Tensão de escoamento (MPa)</i>	<i>Tensão de ruptura (MPa)</i>
1	751,21	781,45
2	738,48	771,90
3	725,75	752,80
Média	738,48	768,72
Desvio padrão	12,73	14,59
Coef. de variação	1,72%	1,90%

Tabela 23 – Tensão de escoamento e tensão de ruptura do aço (Fonte: Autor)

4.1.4 Classificação da matriz autoadensável no estado fresco

A escolha pelo traço da matriz autoadensável procurou atender simultaneamente propriedades como: resistência à compressão semelhante à da argamassa industrializada, habilidade passante, capacidade de preenchimento, resistência à segregação e à exsudação, conforme descrito pela NBR 15823-1: Concreto autoadensável Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco (ABNT, 2017). Em vista disso, decidiu-se por adaptar o traço desenvolvido por Ortolan, Mancio e Tutikian (2016) e reutilizado por Brescovit (2021) e Ortolan (2021).

Para avaliar a autoadensabilidade da matriz no estado fresco, realizaram-se ensaios de mini-slump. O resultado dos ensaios é o espalhamento da matriz, obtido pela média aritmética de 2 medidas perpendiculares do diâmetro, em milímetros, conforme apresentado na Figura 106. Para avaliar a consistência da mistura, utilizou-se o índice de estabilidade visual (IEV), apresentado NBR 15823-2: Concreto autoadensável Parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual - Método do cone de Abrams (ABNT, 2017), como mostrado na Tabela 24.

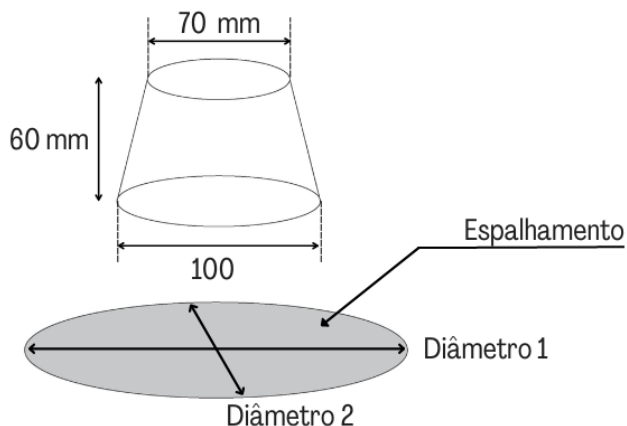


Figura 106 – Configuração do ensaio de mini-slump (Fonte: Autor)

<i>Índice de estabilidade visual (IEV)</i>			
IEV 0 (Altamente estável)	IEV 1 (Estável)	IEV 2 (Instável)	IEV 3 (Altamente instável)
Sem evidência de segregação ou exsudação	Sem evidência de segregação e leve exsudação	Presença de pequena auréola de argamassa (≤ 10 mm) e/ou empilhamento de agregados no centro do concreto	Segregação evidenciada pela concentração de agregados no centro do concreto ou pela dispersão de argamassa nas extremidades (auréola de argamassa > 10 mm)
Vista superior	Vista superior	Vista superior	Vista superior
Corte	Corte	Corte	Corte

Tabela 24 – Classes do índice de estabilidade visual (Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15823-2, 2017)

Para a primeira mistura, buscou-se reproduzir o traço original, porém a argamassa apresentou instabilidade (IEV 2), como pode ser visto na Figura 107 (a). Por conseguinte, realizaram-se novas misturas, mantendo-se o percentual de aditivo de 1,35% e reduzindo-se a relação água/aglomerante de 0,43 para 0,40, 0,35 e 0,30. Verificou-se que, em todos os casos, a matriz apresentou instabilidade, menor espalhamento e maior concentração de argamassa no centro, como mostrado na Figura 107 (b).



Figura 107 – Matrizes autoadensáveis com instabilidade (Fonte: Autor)

Procedeu-se, então, com o ajuste da granulometria da areia, a fim de se aumentar o volume de finos. Em seguida, realizaram-se novos testes com a granulometria apresentada em 3.3.1.2. Optou-se por manter a relação água/aglomerante em 0,43, variando-se o percentual de aditivo superplastificante de 1,35% para 1,20%, 1,10% e 1,00%.

Por fim, verificou-se que a mistura apresentou estabilidade (IEV 1) e espalhamento médio acima de 330 mm para 1,10% de aditivo superplastificante, como mostrado nas Figuras 108 (a) e (b). Para esta configuração, 3 misturas isoladas foram realizadas e os valores medidos são apresentados na Tabela 25.

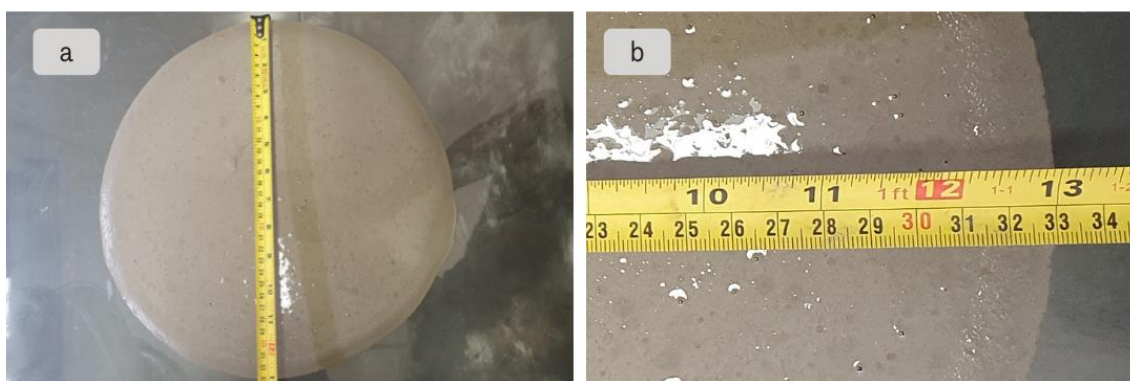


Figura 108 – Matriz autoadensável com estabilidade (Fonte: Autor)

<i>Número da mistura</i>	<i>Diâmetro 1 (mm)</i>	<i>Diâmetro 2 (mm)</i>	<i>Índice de consistência médio</i>
1	329	332	330,5
2	333	330	331,5
3	336	334	335

Tabela 25 – Medidas do índice de espalhamento (Fonte: Autor)

4.1.5 Resistência à compressão das argamassas de reforço

Para a caracterização das argamassas de reforço (matriz 1 e matriz 2), realizou-se a moldagem de corpos de prova cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura para serem rompidos nas idades de 7, 14 e 28 dias, como pode ser visto na Figura 109. Para fins de comparação e controle, 2 corpos de prova adicionais foram moldados da matriz de reforço de cada viga, para serem rompidos aos 28 dias, ou seja, na data do ensaio de flexão da respectiva viga.



Figura 109 – Ensaio de resistência à compressão das argamassas de reforço (Fonte: Autor)

Após à moldagem, os corpos de prova de caracterização das argamassas, ainda nos moldes, foram armazenados em câmara úmida. Terminado o período de cura inicial de 24 horas, os corpos de prova foram retirados das fôrmas, permanecendo em câmara úmida até a idade de ruptura. Os corpos de prova de controle, por sua vez, permaneceram junto às vigas até a data do ensaio de flexão, aos 28 dias. Os resultados são apresentados nas Tabelas 26, 27 e 28.

<i>Nº do CP</i>	<i>Resistência à compressão (MPa)</i>		
	<i>7 dias</i>	<i>14 dias</i>	<i>28 dias</i>
1	23,68	31,72	40,44
2	25,38	33,77	35,52
3	25,30	31,81	36,17
4	29,14	28,64	35,15
5	29,39	33,18	37,23
Média	26,58	31,82	36,90
Desvio padrão	2,55	1,99	2,13
Coef. de variação	9,58%	6,24%	5,77%

Tabela 26 – Resistência à compressão da matriz 1 (argamassa industrializada) (Fonte: Autor)

<i>Nº do CP</i>	<i>Resistência à compressão (MPa)</i>		
	<i>7 dias</i>	<i>14 dias</i>	<i>28 dias</i>
1	26,89	31,62	38,73
2	27,62	32,88	40,61
3	30,01	32,54	43,89
4	32,29	35,82	38,38
5	26,80	32,37	40,58
Média	28,72	33,05	40,44
Desvio padrão	2,38	1,62	2,19
Coef. de variação	8,29%	4,90%	5,41%

Tabela 27 – Resistência à compressão da matriz 2 (argamassa autoadensável) (Fonte: Autor)

<i>Código de referência da viga</i>	<i>Corpos de prova de controle</i>					
	<i>Resistência à compressão (MPa)</i>	<i>Resistência à compressão média da mistura (MPa)</i>	<i>Desvio padrão da mistura (MPa)</i>	<i>Resistência à compressão média da matriz (MPa)</i>	<i>Desvio padrão da matriz (MPa)</i>	<i>Coef. de variação da matriz</i>
M1-SR/V1	40,74 38,64	39,69	1,48			
M1-E-R1/V2	38,15 39,29	38,72	0,81			
M1-E-R2/V3	33,77 36,36	35,07	1,83			
M1-EA-R1/V4	45,13 44,26	44,70	0,62	39,79	2,84	7,14%
M1-EA-R2/V5	39,51 40,83	40,17	0,93			
M1-EAP-R1/V6	37,88 41,20	39,54	2,35			
M1-EAP-R2/V7	41,92 39,37	40,65	1,80			
M2-SR/V8	46,96 45,80	46,38	0,82			
M2-E-R1/V9	52,60 45,36	48,98	5,12			
M2-E-R2/V10	45,57 47,10	46,34	1,08			
M2-EA-R1/V11	47,61 48,36	47,99	0,53	44,15	5,69	12,88%
M2-EA-R2/V12	43,78 41,36	42,57	1,71			
M2-EAP-R1/V13	50,10 45,34	47,72	3,37			
M2-EAP-R2/V14	33,02 32,22	32,62	0,57			

Tabela 28 – Resistência à compressão dos corpos de prova de controle (Fonte: Autor)

A partir dos resultados dos CPs de caracterização, verifica-se que a matriz 2 apresentou resistência à compressão média 9,49% superior à da matriz 1. Além disso, os CPs de controle de ambas as matrizes apresentaram resistência à compressão média superior aos CPs de caracterização, sendo de 7,83% e 9,17% para as matrizes 1 e 2, respectivamente.

4.1.6 Módulo de elasticidade estático das argamassas de reforço

Do mesmo modo que para os corpos de prova de concreto para a determinação do módulo de elasticidade estático das argamassas de reforço, seguiu-se as diretrizes da Metodologia A - Tensão fixa, descrita na NBR 8522: Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação (Parte 1): Módulos estáticos à compressão (ABNT, 2021). Realizou-se o ensaio em 3 corpos de prova na idade de 28 dias (matrizes 1 e 2), como mostrado na Figura 110. Os valores obtidos podem ser verificados nas Tabelas 29 e 30.



Figura 110 – Ensaio de módulo de elasticidade estático das argamassas (Fonte: Autor)

<i>Nº do CP</i>	<i>Módulo de elasticidade (GPa)</i>
1	30,85
2	32,82
3	32,95
Média	32,21
Desvio padrão	1,18
Coef. de variação	3,66%

Tabela 29 – Módulo de elasticidade da matriz 1 (argamassa industrializada) (Fonte: Autor)

<i>Nº do CP</i>	<i>Módulo de elasticidade (GPa)</i>
1	27,92
2	28,37
3	31,70
Média	29,33
Desvio padrão	2,06
Coef. de variação	7,04%

Tabela 30 – Módulo de elasticidade da matriz 2 (argamassa autoadensável) (Fonte: Autor)

4.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS

De modo geral, o programa experimental é composto por 14 vigas de concreto armado reforçadas à flexão e 1 viga testemunho, totalizando 15 vigas, cujas variáveis de investigação estão apresentadas em 3.1. A síntese de resultados dos ensaios de flexão pode ser verificada no Apêndice A.

4.2.1 Carga de ruptura teórica

Para a verificação da carga de ruptura teórica, empregaram-se os dados apresentados nas Tabelas 31, 32, 33 e 34. Para o têxtil, fez-se a consideração que apenas os fios de urdume contribuem para resistir aos esforços. Logo, utilizou-se dos dados obtidos nos ensaios de Dalazen (2021), uma vez que o têxtil empregado pela autora é o mesmo desta pesquisa. Ressalta-se, contudo, que os cálculos teóricos não consideram a presença do revestimento de resina epóxi e areia. A planilha de verificação, desenvolvida para a análise teórica, pode ser verificada no Apêndice B.

<i>Dados da seção</i>	
Largura da base da viga	12,00 cm
Altura da viga	20,00 cm
Comprimento da viga	150,00 cm
Vão da viga (distância entre os apoios)	140,00 cm
Cobrimento da seção de concreto	2,00 cm
Distância entre a fibra mais comprimida e o centróide da armadura longitudinal tracionada	17,25 cm
Distância entre a fibra mais comprimida e o centróide da armadura longitudinal comprimida	2,75 cm
Distância entre a fibra mais comprimida e o centróide do reforço de concreto têxtil	21,475 cm

Tabela 31 – Dados da geometria das vigas (Fonte: Autor)

<i>Concreto</i>	
Módulo de elasticidade do concreto	29,39 GPa
Resistência característica à compressão do concreto	32,55 MPa

Tabela 32 – Parâmetros do concreto (Fonte: Autor)

<i>Aço</i>	
Resistência de escoamento da armadura longitudinal ($A_{s1} = A_{s2}$)	738,48 MPa
Módulo de elasticidade do aço	210,00 GPa
Tensão na armadura longitudinal tracionada	73,85 kN/cm ²
Número de barras da armadura longitudinal tracionada	2 barras
Diâmetro das barras da armadura longitudinal tracionada	0,50 cm
Área da seção transversal da armadura longitudinal tracionada	0,39 cm ²
Tensão na armadura longitudinal comprimida	73,85 kN/cm ²
Número de barras da armadura longitudinal comprimida	2 barras
Diâmetro das barras da armadura longitudinal comprimida	0,50 cm
Área da seção transversal da armadura longitudinal comprimida	0,39 cm ²
Diâmetro dos estribos	0,50 cm

Tabela 33 – Parâmetros do aço (Fonte: Autor)

<i>Concreto têxtil</i>	
Número de camadas de têxtil	3 camadas
Espessura do têxtil	0,115 cm
Número de fios de urdume	8 urdumes
Carga máxima do fio de urdume	0,66 kN
Área do fio	0,0175 cm ²
Área da seção transversal do têxtil	0,3675 cm ²
Tensão no têxtil	37,71 kN/cm ²
Módulo de elasticidade do têxtil	8000,00 kN/cm ²
Número de camadas de reforço de argamassa	4 camadas
Espessura da camada de argamassa	0,60 cm

Tabela 34 – Parâmetros do concreto têxtil (Fonte: Autor)

Deste modo verifica-se que o momento último das vigas sem reforço é de 504,81 kNcm, para uma carga de 21,63 kN. Após o reforço com 3 camadas de concreto têxtil, tem-se que o momento último teórico é de 823,76 kNcm, para uma carga de 35,30 kN.

Para validar a análise teórica e comparar com o resultado experimental, realizou-se a análise numérica e a modelagem computacional da viga testemunho no *software* ANSYS na versão *Student 2022 R2*. A partir da solução numérica, verificou-se a ruptura da viga testemunho para a carga de 21,8 kN. Detalhes sobre a modelagem podem ser verificadas no Apêndice C.

4.2.2 Viga testemunho

O ensaio de flexão a 4 pontos da viga testemunho ocorreu aos 263 dias, junto à ruptura das vigas reforçadas do lote 1. Durante o ensaio, monitorou-se o comportamento do elemento estrutural até a queda significativa da carga, indicando a ruptura.

Para determinar a deflexão da viga, considerou-se a média das leituras dos LVDTs, como pode ser visto na Figura 111 (a). Para medir a deformação específica das armaduras positivas, considerou-se a média das leituras do extensômetros, como apresentado na Figura 111 (b).

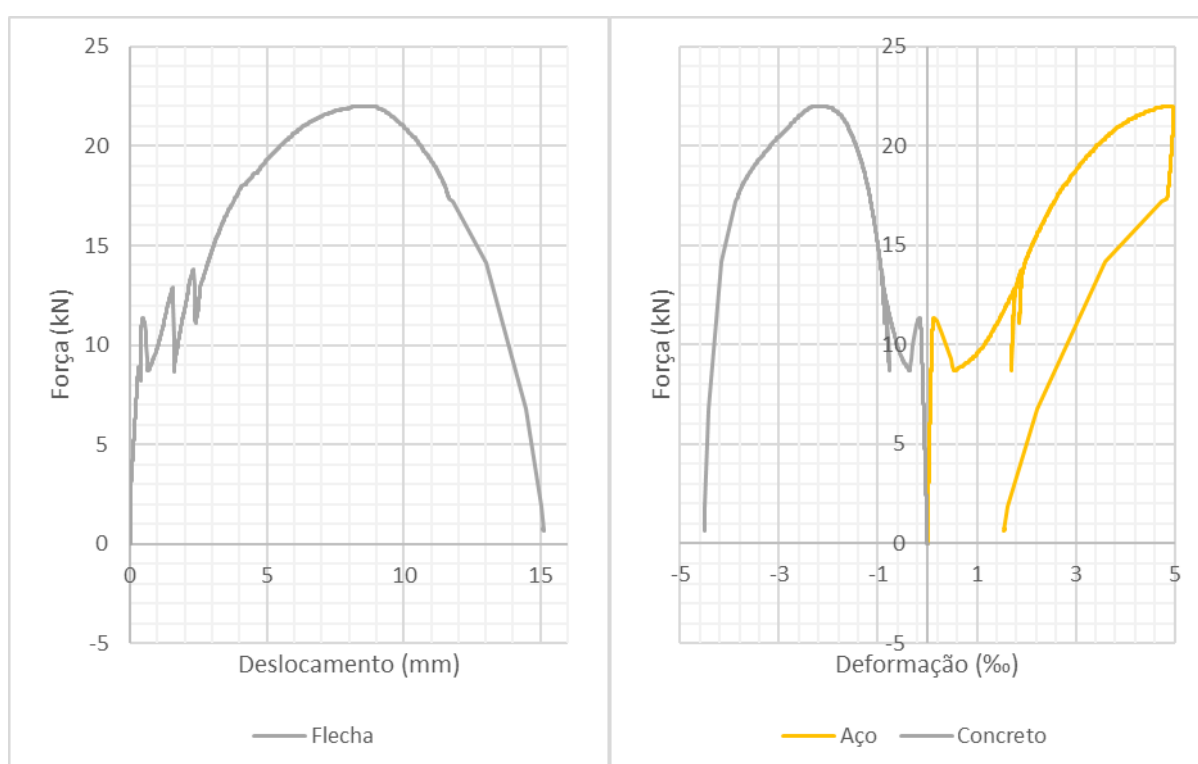


Figura 111 – Curva da carga em função do deslocamento no centro do vão (a) e as deformações específicas do aço e do concreto (b) da viga testemunho (Fonte: Autor)

Como pode ser observado na Figura 111 (a), entre as cargas de 9,0 kN e 18,5 kN, há inúmeras alterações abruptas nos valores do carregamento, uma vez que estão relacionadas ao processo de fissuração do elemento reforçado. O início da fissuração ocorre para a carga de 8,89 kN, onde tem-se o surgimento da primeira fissura.

Quanto à Figura 111 (b), identifica-se que a deformação específica do concreto se manteve abaixo de 3,5‰ até o estágio avançado de escoamento do aço. Para este último, por sua vez, tem-se leitura até a deformação específica de 5‰, devido à ruptura precoce do extensômetro.

Ao término do ensaio, observou-se o escoamento do aço, acompanhado de uma fissura de maior abertura no centro da viga, como pode ser visto na Figura 112.



Figura 112 – Ruptura da viga testemunho (Fonte: Autor)

Conclui-se que, devido à taxa de armadura reduzida (0,16%), o modo de ruptura da viga testemunho caracterizou-se pela deformação excessiva da armadura longitudinal, associada à abertura de fissuras na região tracionada e à deslocamentos verticais significativos, comportamentos esperados para elementos dimensionados no domínio 2. A carga de ruptura foi de 22,00 kN, valor próximo aos obtidos nas análises teórica e numérica, como pode ser verificado na Tabela 35.

<i>Viga testemunho</i>	<i>Força máxima (kN)</i>
Viga (análise teórica)	21,63
Viga (análise numérica)	21,80
Viga (análise experimental)	22,00
Média	21,81
Desvio padrão	0,18
Coef. de variação	0,85%

Tabela 35 – Comparativo entre as cargas de ruptura da viga testemunho (Fonte: Autor)

4.2.3 Análise de resultados dos ensaios de flexão

O reforço de vigas de concreto armado com concreto têxtil consiste em integrar o compósito à região tracionada do elemento estrutural. Consequentemente, espera-se o aumento da capacidade resistente do elemento reforçado.

Desse modo, para a análise de resultados dos ensaios de flexão, utilizou-se a viga testemunho como referência. Para acompanhar o desempenho mecânico das vigas, realizou-se o

monitoramento de cargas, deslocamentos e deformações específicas. Apenas os LVDTs da viga V11 (M2-EA-R1) apresentaram problemas de fixação e se movimentaram durante o ensaio, ocasionando perda de leitura da deflexão da viga a partir da flecha de 7,39 mm, aproximadamente.

4.2.3.1 Carga máxima

A partir dos resultados dos ensaios de flexão, verificam-se que todas as vigas apresentaram aumento da capacidade resistente (força máxima) em comparação à viga testemunho, como apresentado na Figura 113.

Para facilitar a identificação das variáveis de estudo, empregou-se o padrão repetido de cores para destacar as vigas que possuem o mesmo revestimento para o têxtil (epóxi, epóxi e areia ou epóxi e parcial de areia), e a presença ou não de hachura para diferenciar as vigas quanto ao tipo de matriz (argamassa industrializada ou autoadensável), denominadas de M1 e M2.

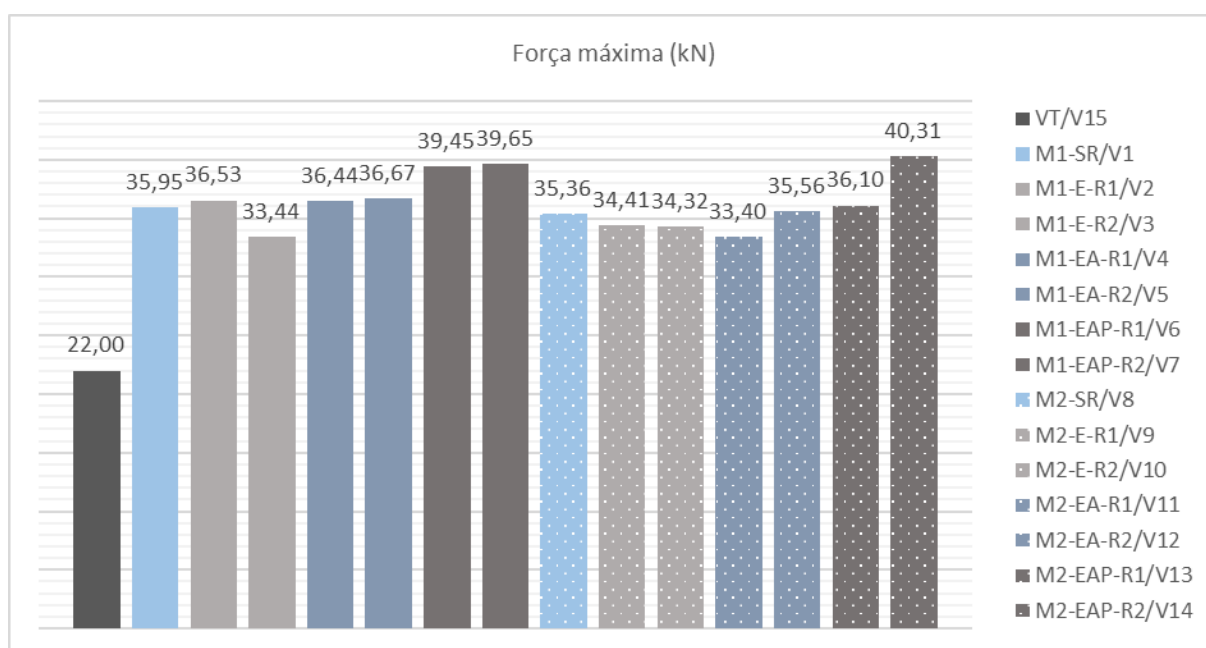


Figura 113 – Cargas máximas resistidas pelas vigas (Fonte: Autor)

Para atestar a eficiência do reforço, pode-se verificar o percentual de aumento da capacidade resistente das vigas reforçadas em relação à carga máxima resistida pela viga testemunho. Os resultados são apresentados na Figura 114.

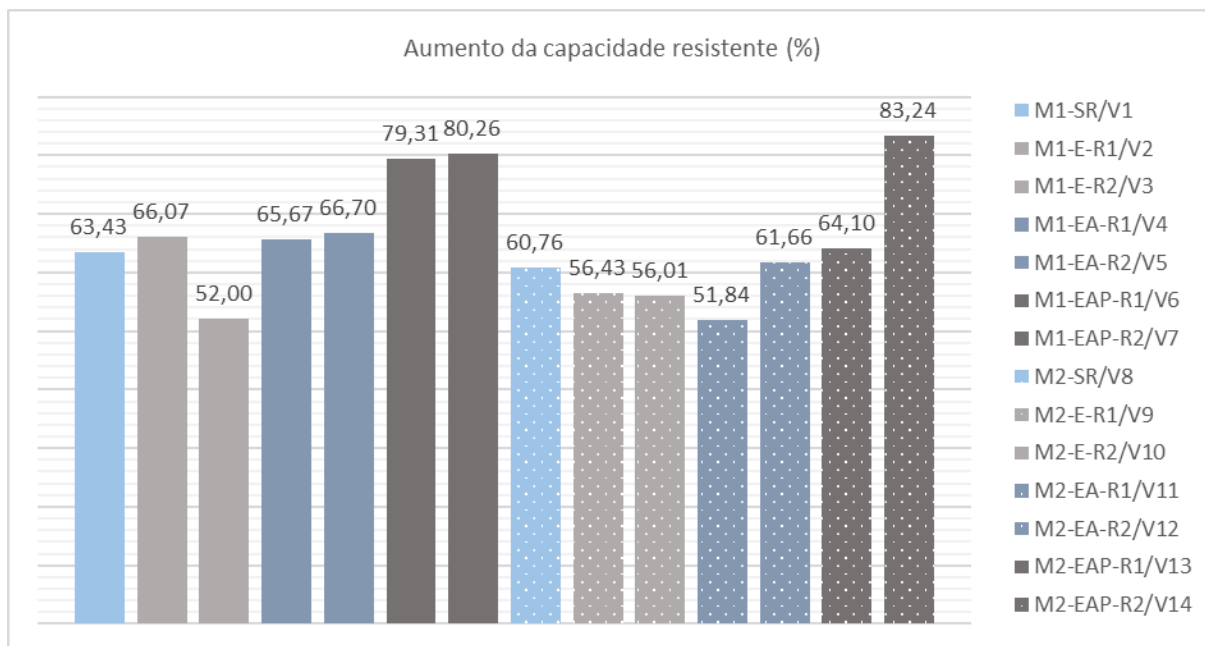


Figura 114 – Aumento da capacidade resistente das vigas em relação à VT (Fonte: Autor)

A partir dos dados apresentados nas Figuras 113 e 114, observa-se que, apesar da grande variabilidade dos resultados, o aumento da capacidade resistente de todas as vigas foi significativo. Para a matriz 1, as cargas máximas revelaram aumentos entre 52,0% e 80,26%. Para a matriz 2, os aumentos foram semelhantes, variando de 51,84% a 83,24%.

Quanto à carga máxima, pode-se avaliar, também, o desempenho do reforço, comparando-se os percentuais de aumento, verificados nos ensaios, com o percentual de aumento calculado na análise teórica. Nesta perspectiva, tem-se que o momento último teórico das vigas sem reforço se dá para a carga de 21,63 kN. Após 3 camadas de reforço têxtil, a carga máxima sobe para 35,3 kN, indicando aumento de 63,2%, como pode ser visto na Tabela 36.

<i>Viga teórica</i>	<i>Referência</i>	<i>Força máxima teórica (kN)</i>	<i>Aumento teórico da capac. resistente estimado (%)</i>
Não reforçada	V-NR	21,63	-
Reforçada	V-R	35,30	63,20

Tabela 36 – Aumento teórico estimado da capacidade resistente das vigas reforçadas (Fonte: Autor)

Por conseguinte, ao comparar-se o aumento da capacidade resistente esperado com os valores verificados nos ensaios, tem-se os percentuais apresentados na Figura 115.

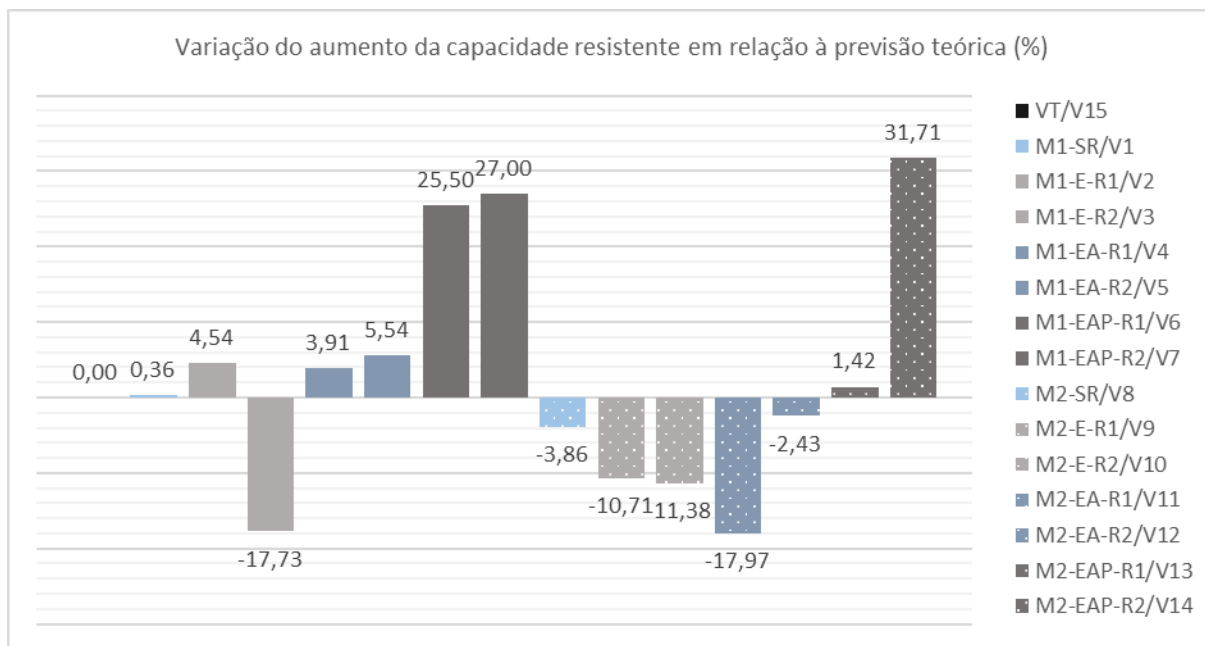


Figura 115 – Comparativo entre a capacidade resistente esperada e a experimental (Fonte: Autor)

A partir do comparativo, verificam-se que as vigas M1-SR, M1-E-R1, M1-EA-R1, M1-EA-R2, M2-EAP-R1 apresentaram cargas muito próximas da prevista analiticamente, embora com aumentos discretos que variaram de 0,36% a 5,54%. As vigas M1-EAP-R1, M1-EAP-R2 e M2-EAP-R2, por sua vez, apresentaram aumentos significativos, que variaram de 25,2% a 31,71%, além do esperado pela análise teórica. As demais vigas, contudo, apresentaram aumento da capacidade de carga abaixo do esperado.

4.2.3.2 Comportamento à flexão

Quanto aos esforços de flexão, observa-se que o comportamento da curva que relaciona força e deslocamento é ascendente após a fissuração da matriz em todas as vigas reforçadas, caracterizando o comportamento de endurecimento por deflexão (*deflection-hardening*), como pode ser visto na Figura 116.

Embora identifiquem-se diferentes inclinações, as curvas que caracterizam o comportamento mecânico de todas as vigas reforçadas à flexão em estudo apresentam 4 zonas características. Inicialmente, identifica-se o patamar elástico, no qual as tensões atuantes na seção são inferiores à resistência do elemento reforçado, promovendo deformações e deflexões pequenas.

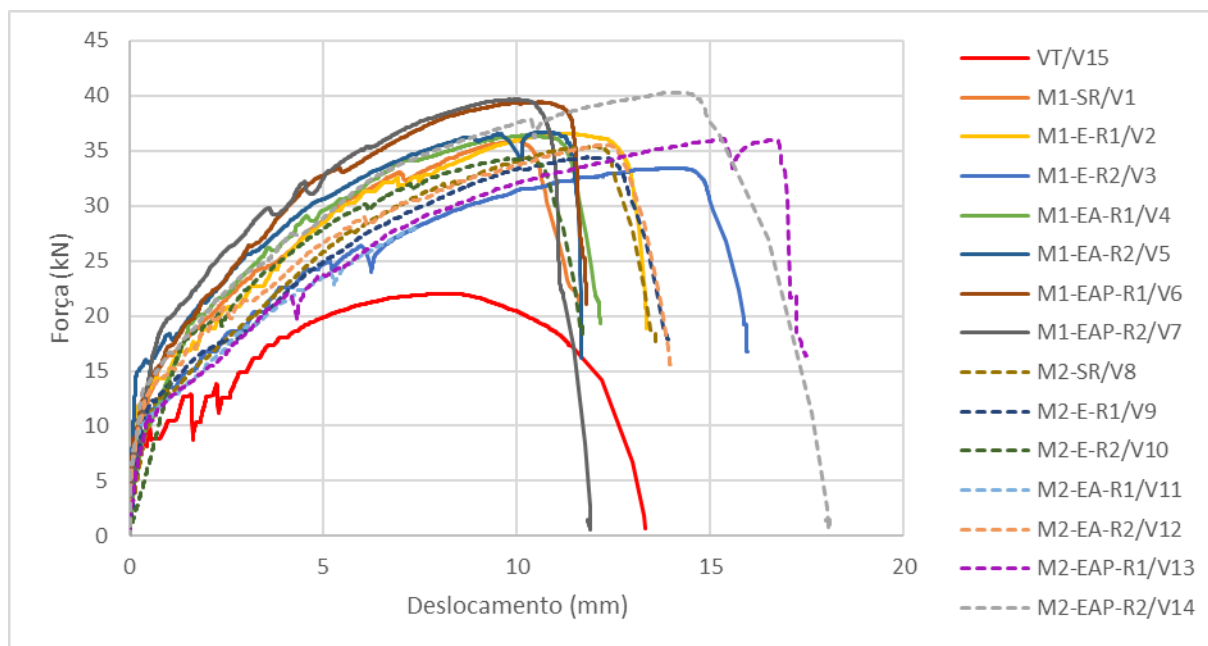


Figura 116 – Curva carga deslocamento no centro do vão das vigas (Fonte: Autor)

Por conseguinte, observa-se a formação das primeiras fissuras, indicando que as resistências à tração das matrizes de cimento de ambos os compósitos foram superadas. Nesse instante, verificam-se que as matrizes deixam de contribuir efetivamente para o equilíbrio da seção e as tensões passam a ser resistidas pelas armaduras longitudinais e pelo têxtil. Neste estágio, observa-se que a curva é menos inclinada que no trecho anterior, em função da ativação predominante do aço e da pouca participação do têxtil.

Com o aumento progressivo da força, identifica-se o escoamento da armadura de tração. Deste ponto em diante, o aumento da capacidade de carga da viga reforçada passa a depender, principalmente, do têxtil. Este comportamento é caracterizado pela mudança de inclinação da curva da carga em função do deslocamento.

Por fim, quando o têxtil atinge a tensão de ruptura ou há perda de aderência na interface têxtil-matriz, verifica-se a queda abrupta da capacidade de carga e a ruptura da viga. Detalhes sobre as deformações específicas do aço, do concreto e do têxtil podem ser lidos em 4.2.3.5 e 4.2.3.6.

4.2.3.3 Influência do tipo de matriz e do revestimento no reforço têxtil

A partir da discussão iniciada em 4.2.4.1, procura-se estabelecer relações entre as variáveis “tipo da matriz” e “revestimento do reforço” e os resultados dos ensaios experimentais. Como os cálculos teóricos não consideram a existência de matrizes cimentícias distintas nem a presença de resina e areia como revestimento do reforço, pode-se aferir se o comportamento mecânico das vigas é resultado da ação individual ou combinada de ambas. Para tanto, descarta-se qualquer variável desconhecida que possa ter alterado os resultados.

Analisando-se a variável “revestimento do reforço” em relação à carga máxima, observa-se grande variabilidade de resultados, como evidenciado na Tabela 37. Constata-se que as maiores variações ocorreram nos exemplares revestidos de epóxi e areia, e as menores nos exemplares revestidos com epóxi e areia em dois terços das tiras.

<i>Referência</i>	<i>Variação do aumento capac. resistente (%)</i>	<i>Média (%)</i>	<i>Desvio padrão (%)</i>	<i>Coef. de variação (%)</i>
M1-SR/V1	0,36	-1,75	2,99	-170,63%
M2-SR/V8	-3,86			
M1-E-R1/V2	4,54	-8,82	9,45	-107,13%
M1-E-R2/V3	-17,73			
M2-E-R1/V9	-10,71			
M2-E-R2/V10	-11,38			
M1-EA-R1/V4	3,91	-2,74	10,72	-391,67%
M1-EA-R2/V5	5,54			
M2-EA-R1/V11	-17,97			
M2-EA-R2/V12	-2,43			
M1-EAP-R1/V6	25,50			
M1-EAP-R2/V7	27,00			
M2-EAP-R1/V13	1,42	21,41	13,58	63,45%
M2-EAP-R2/V14	31,71			

Tabela 37 – Comparativo de desempenho das vigas em relação aos diferentes tipos de revestimento do têxtil (Fonte: Autor)

Na Figura 117, observa-se a mudança de comportamento das vigas M1-SR e M2-SR em relação à viga testemunho. Nestes exemplares, o têxtil não possui revestimento. Embora para M2, verificou-se uma variação do aumento da capacidade resistente de -3,86% abaixo do esperado, observa-se a proximidade dos resultados experimentais com a previsão teórica.

De modo geral, observa-se que o revestimento de epóxi influenciou negativamente no desempenho do reforço, uma vez que 75% das amostras (vigas M1-E-R2, M2-E-R1 e M2-E-R2) apresentaram desempenho abaixo do esperado. Apenas a viga M1-E-R1 apresentou aumento da capacidade resistente superior à carga calculada analiticamente de 35,3 kN, como pode ser visto na Figura 118.

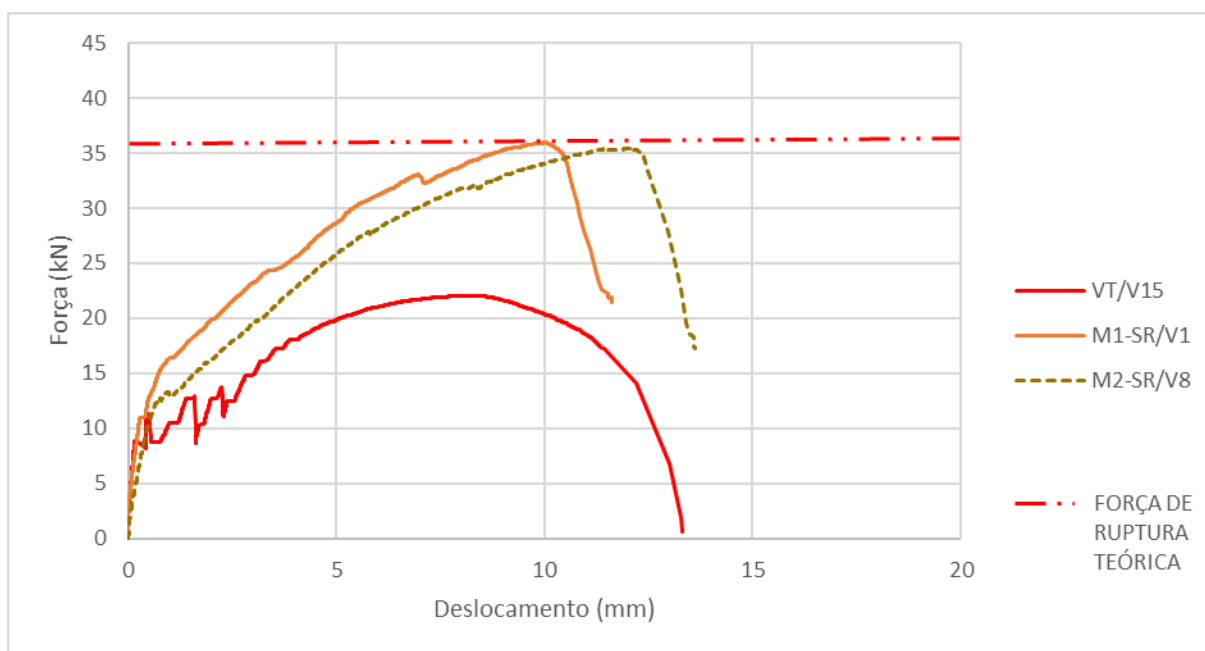


Figura 117 – Curva carga deslocamento das vigas VT, V1 e V8 (Fonte: Autor)

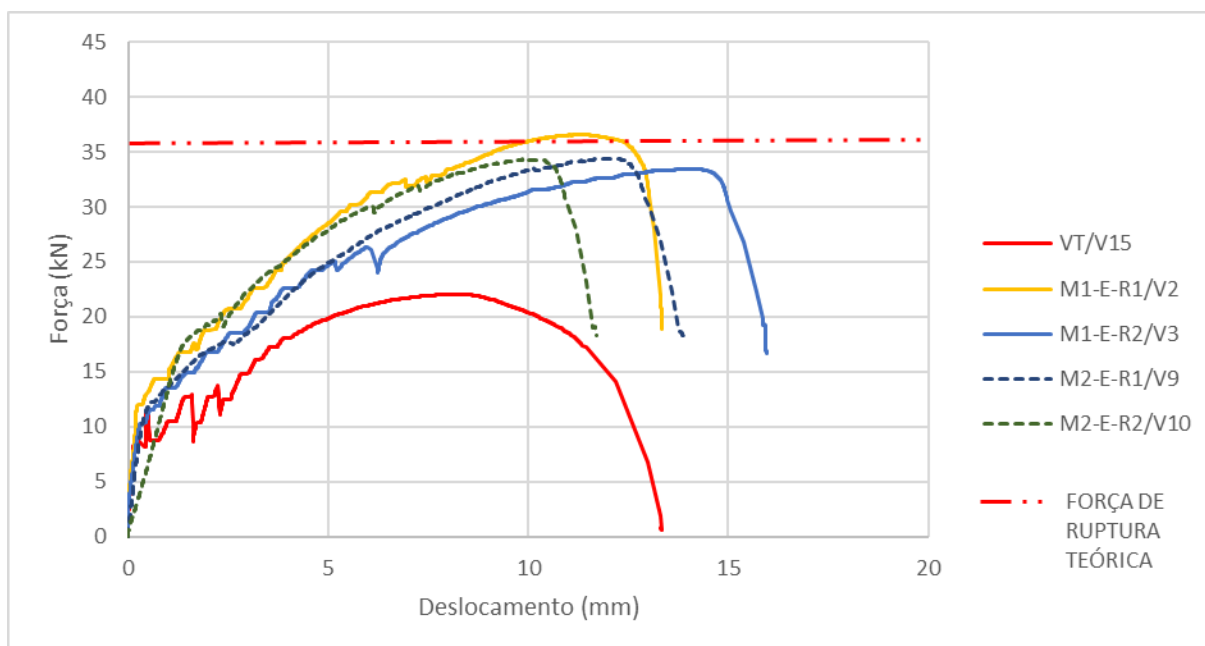


Figura 118 – Curva carga deslocamento das vigas VT, V2, V3, V9 e V10 (Fonte: Autor)

Para o revestimento de epóxi e areia, as vigas M1-EA-R1 e M1-EA-R2 apresentaram resultados semelhantes. Os percentuais de 3,91% e 5,54% representam a contribuição das variáveis no aumento da capacidade resistente. Ao atingirem 36,44 kN e 36,67 kN, observam-se aumentos de 3,24% e 3,88% no valor da força máxima (acima do esperado) nas respectivas vigas.

Tal feito, entretanto, não pôde ser observado nas vigas reforçadas com argamassa autoadensável (M2), indicando possível contribuição da matriz nas vigas reforçadas com argamassa industrializada (M1), como pode ser visto na Figura 119. Ademais, analisando-se somente em função da carga máxima, o revestimento de epóxi e areia nas vigas M2-EA-R1 e M2-EA-R2 parece ter sido prejudicial, semelhante ao ocorrido nos exemplares revestidos de epóxi.

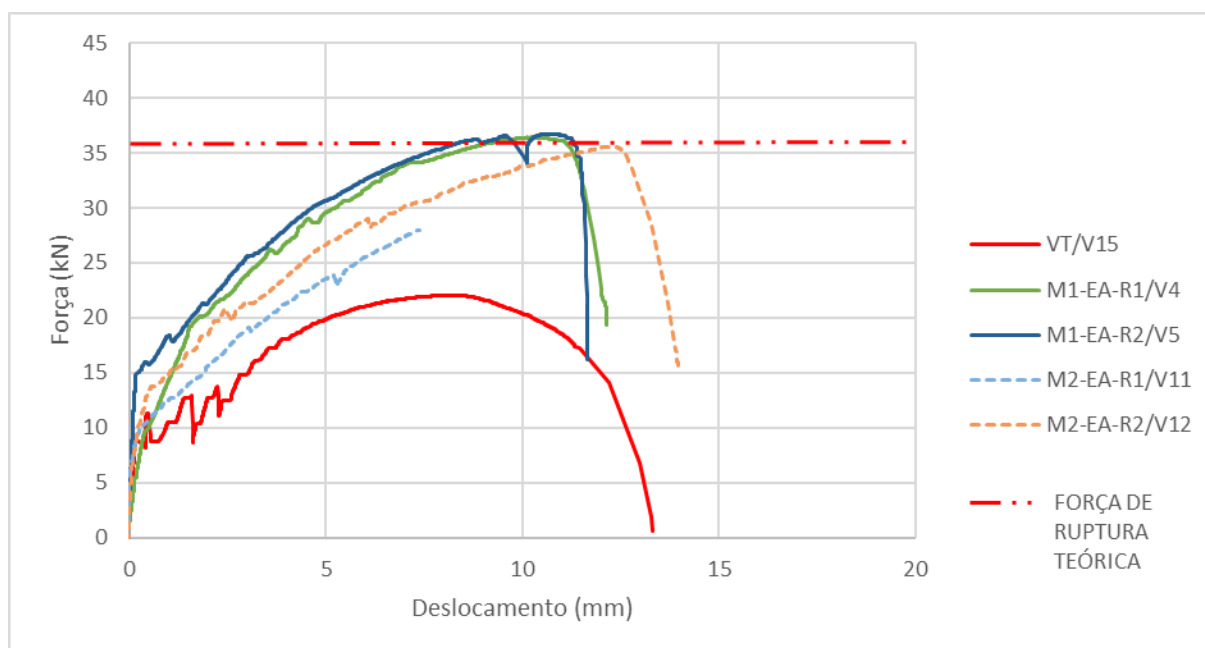


Figura 119 – Curva carga deslocamento das vigas VT, V4, V5, V11 e V12 (Fonte: Autor)

Na contramão dos resultados anteriores, a presença do revestimento de epóxi e parcial de areia parece ter contribuído significativamente para o aumento da capacidade resistente das vigas M1-EAP-R1, M1-EAP-R2 e M2-EAP-R2. Observa-se que 75% dos exemplares desta variável apresentaram aumentos que superaram em mais de 25% a carga esperada, como pode ser visto na Figura 120. A viga M2-EAP-R1, embora tenha apresentado o desempenho mais baixo dentre os exemplares, superou em 1,42% a previsão teórica.

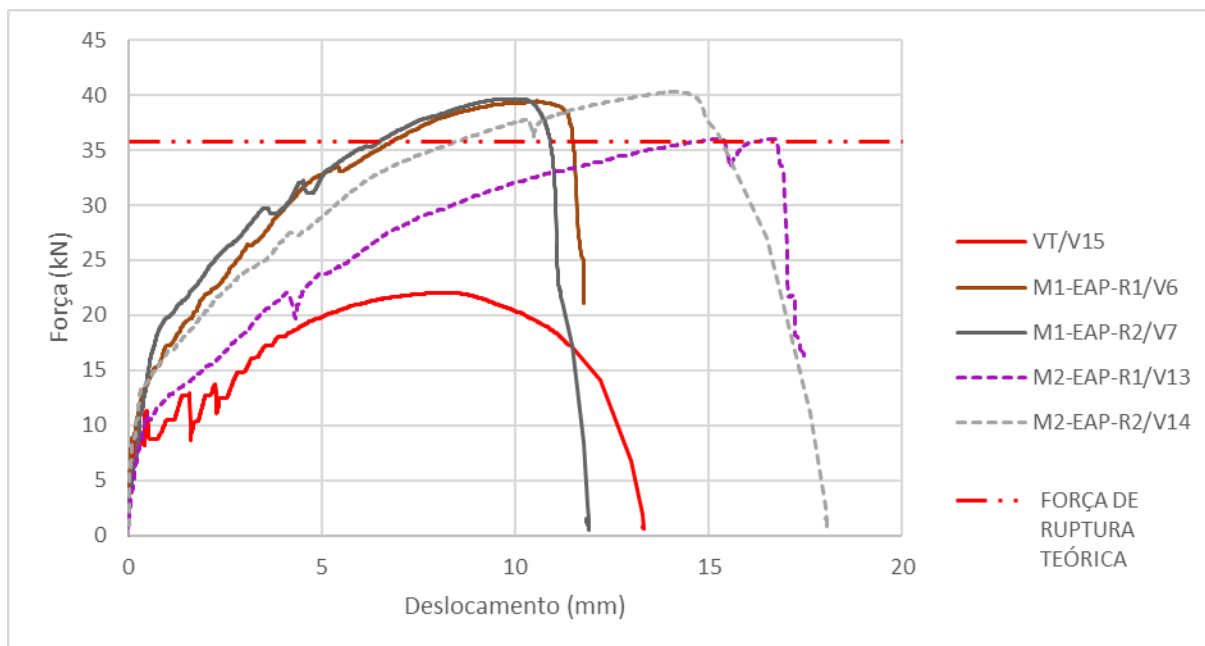


Figura 120 – Curva carga deslocamento das vigas VT, V6, V7, V13 e V14 (Fonte: Autor)

Quanto à observação visual dos exemplares durante os ensaios de flexão, notou-se que as vigas reforçadas com têxteis revestidos de areia apresentaram ampla distribuição de fissuras, porém com aberturas menores, quando comparadas às vigas cujos têxteis não foram revestidos e/ou revestidos somente com resina epóxi.

4.2.3.4 Deslocamento-limite

Além da análise de carga máxima, pode-se verificar o desempenho à flexão das vigas quanto ao estado limite de serviço (ELS). Deste modo, investigam-se os deslocamentos-limites de $l/250$ e $l/350$, valores normalizados para verificação em serviço do estado-limite de deformações excessivas em estruturas, conforme recomendado pela NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento (ABNT, 2014). Logo, tem-se que os valores máximos de deflexão para a aceitabilidade sensorial são de 5,6 mm e 4,0 mm, respectivamente.

À vista disso, pode-se identificar os valores mínimos necessários de força que fizeram com que cada viga do programa experimental apresentasse os mesmos deslocamentos-limites estabelecidos pela NBR 6118 (ABNT, 2014). A partir destes valores, exibidos na Tabela 38, pode-se medir o aumento percentual da capacidade resistente das vigas, como pode ser visto no gráfico da Figura 121.

Referência	Força (kN)	
	$l/250$ (5,6 mm)	$l/350$ (4,0 mm)
VT/V15	20,62	18,07
M1-SR/V1	30,47	25,49
M1-E-R1/V2	30,20	25,39
M1-E-R2/V3	25,52	22,58
M1-EA-R1/V4	30,67	26,84
M1-EA-R2/V5	31,81	28,18
M1-EAP-R1/V6	33,23	29,60
M1-EAP-R2/V7	34,31	29,73
M2-SR/V8	27,45	22,76
M2-E-R1/V9	26,28	21,98
M2-E-R2/V10	29,28	25,29
M2-EA-R1/V11	24,63	21,29
M2-EA-R2/V12	27,93	23,76
M2-EAP-R1/V13	24,66	21,72
M2-EAP-R2/V14	30,73	26,79

Tabela 38 – Valores de força no estado limite de serviço (deflexões de $l/250$ e $l/350$) (Fonte: Autor)

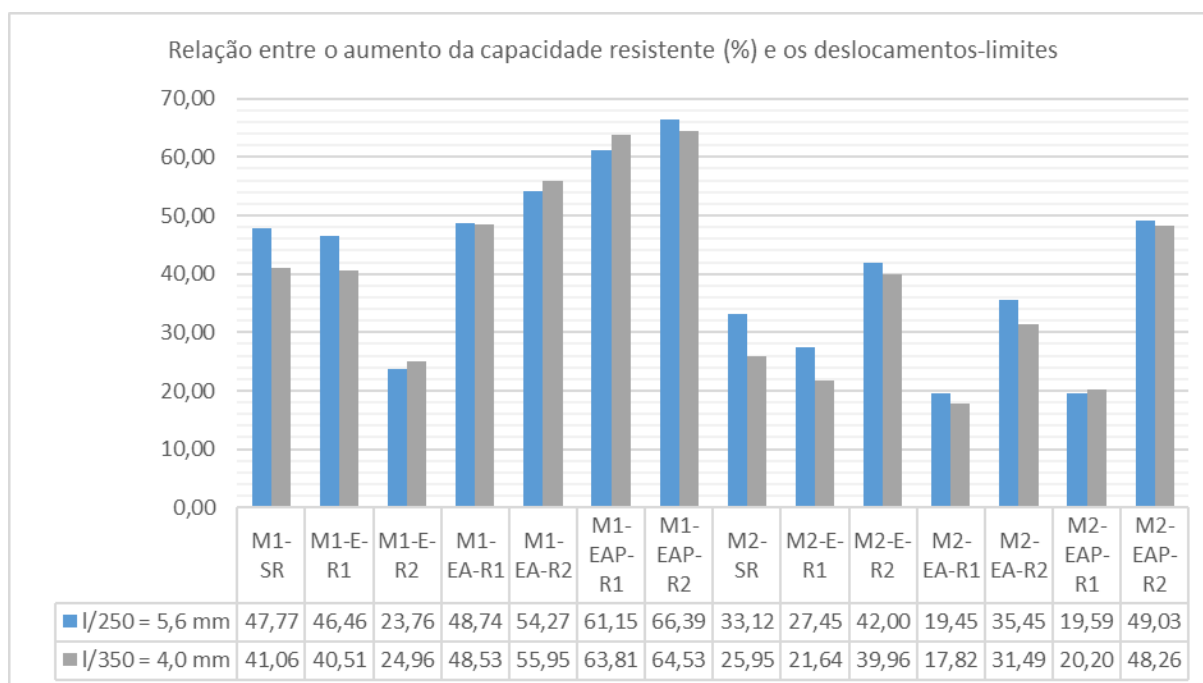


Figura 121 – Aumento percentual da capacidade resistente das vigas reforçadas quanto aos deslocamentos-limites em comparação aos da viga testemunho (Fonte: Autor)

Observa-se, por exemplo, que a viga testemunho (VT) apresentou 5,6 mm de deflexão ao atingir a carga de 20,62 kN. Comparativamente à viga M1-SR, reforçada com 3 camadas de têxtil sem *coating*, a força necessária foi de 30,47 kN, caracterizando aumento de 47,77%. Os maiores valores, contudo, são observados para as vigas de M1, especialmente nos exemplares em que há presença de resina epóxi e areia sobre o têxtil. Quanto à M2, apenas a viga M2-EAP-R2 apresentou resultado semelhante. A diferença de desempenho, neste caso, pode estar relacionada ao tipo de matriz, uma vez que a presença de fibras sintéticas na composição da argamassa industrializada pode ter alterado o comportamento do elemento estrutural.

Para completar a análise, além dos valores de deflexão medidos no instante de ruptura das vigas, fez-se a comparação dos deslocamentos percebidos para as cargas de 20 kN e 30 kN. Escolheu-se o valor de 20 kN, uma vez que ele está próximo da carga máxima percebida pela viga testemunho. Os resultados são apresentados na Figura 122.

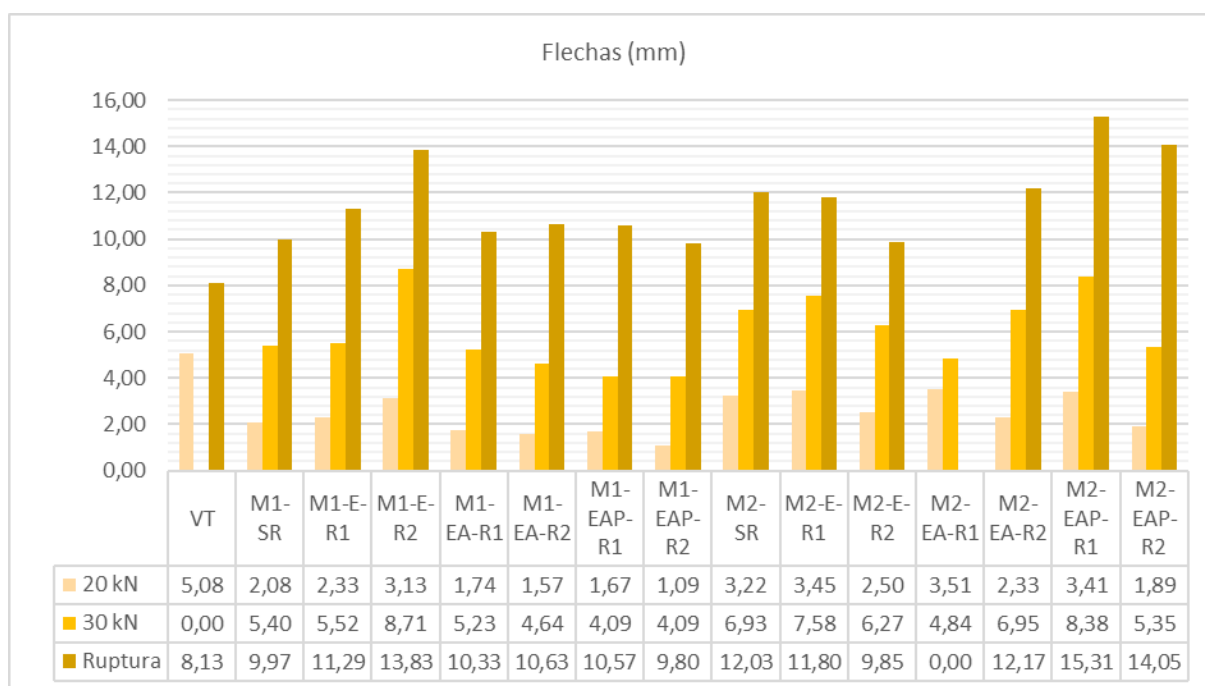


Figura 122 – Comparativo entre os valores de deflexão das vigas para as cargas de 20 kN, 30 kN e de ruptura (carga máxima) (Fonte: Autor)

A partir dos comparativos, verifica-se que os deslocamentos de todas as vigas reforçadas foram inferiores ao da viga testemunho para a carga de 20 kN. Em relação à viga M1-EAP-R1, exemplar de menor deflexão, o valor da flecha se mostrou 4,66 vezes menor que o da VT. De modo geral, observa-se que as menores deflexões se deram para as vigas com concreto

têxtil da matriz 1 (argamassa industrializada) com têxtil revestido de epóxi e areia. Com o aumento da carga, este comportamento se mantém.

4.2.3.5 Modo de ruptura

De modo geral, definiu-se o modo de ruptura das vigas do programa experimental a partir da análise dos dados obtidos pelos extensômetros e do registro fotográfico dos ensaios. Para tanto, semelhante à verificação das deflexões, levantou-se as deformações específicas do aço e do concreto para as cargas de 20 kN, 30 kN e de ruptura, como apresentado nas Figuras 123 e 124. Considerou-se valores positivos para as deformações de tração (alongamentos) e negativos para as deformações de compressão (encurtamentos). Determinou-se que as vigas atingiram as deformações de entrada no estado plástico e de ruptura, respectivamente, iguais a 2,86 ‰ e 10,0‰ para o aço (CA-60), e 2,0‰ e 3,5‰ para o concreto.

Deste modo, identifica-se que todas as vigas reforçadas apresentaram escoamento da armadura longitudinal. Com exceção das vigas M1-EA-R1 e M1-EA-R2, exemplares em que pode ter ocorrido a ruptura prematura dos extensômetros, observam-se deformações máximas próximas ou superiores a 10,0‰. Para o concreto, observam-se deformações máximas inferiores a 3,5‰. O registro gráfico das deformações pode ser visto nas Figuras 125 e 126.

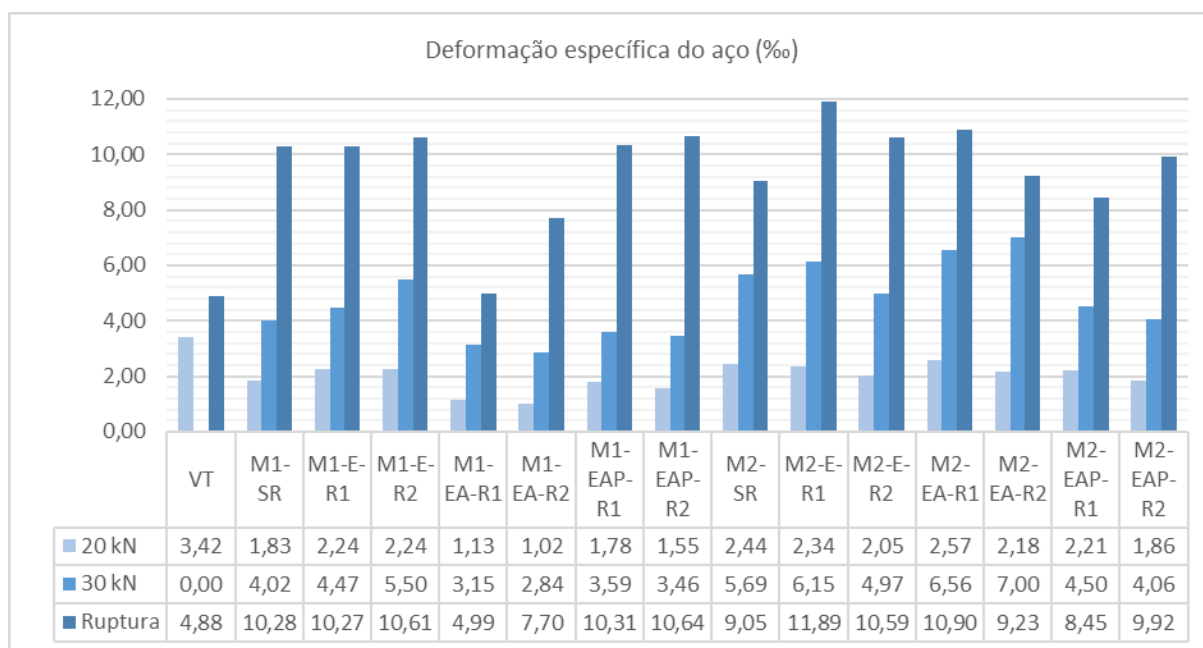


Figura 123 – Comparativo entre os valores de deformação específica do aço para as cargas de 20 kN, 30 kN e de ruptura (carga máxima) (Fonte: Autor)

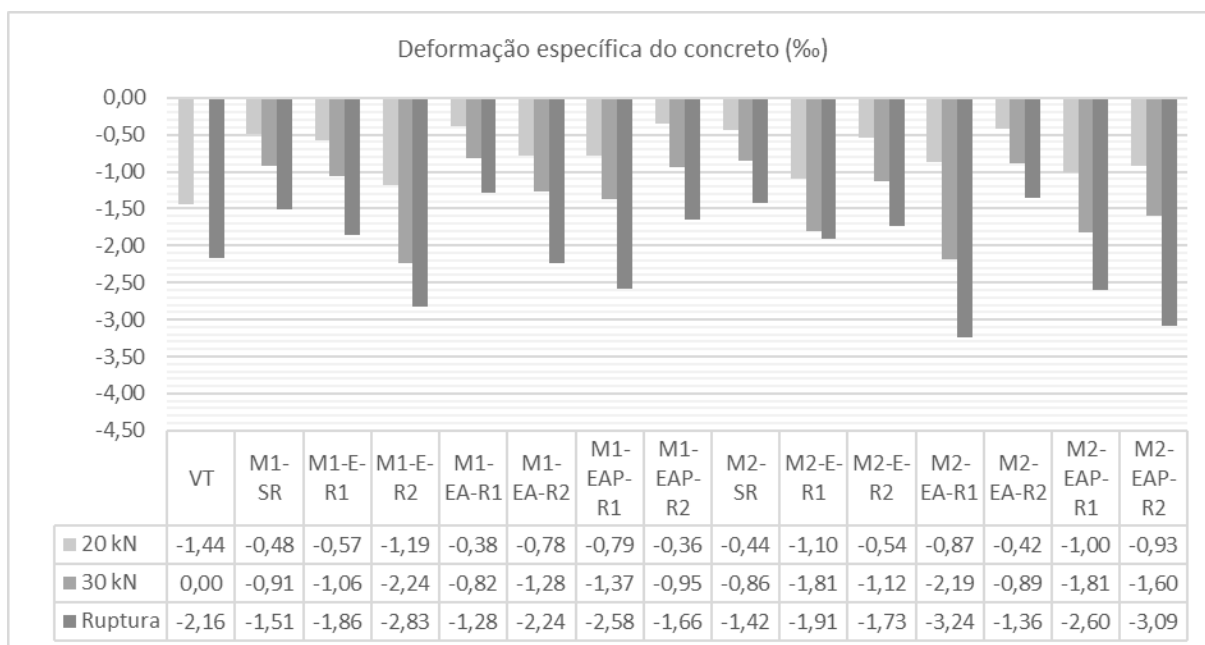


Figura 124 – Comparativo entre os valores de deformação específica do concreto para as cargas de 20 kN, 30 kN e de ruptura (carga máxima) (Fonte: Autor)

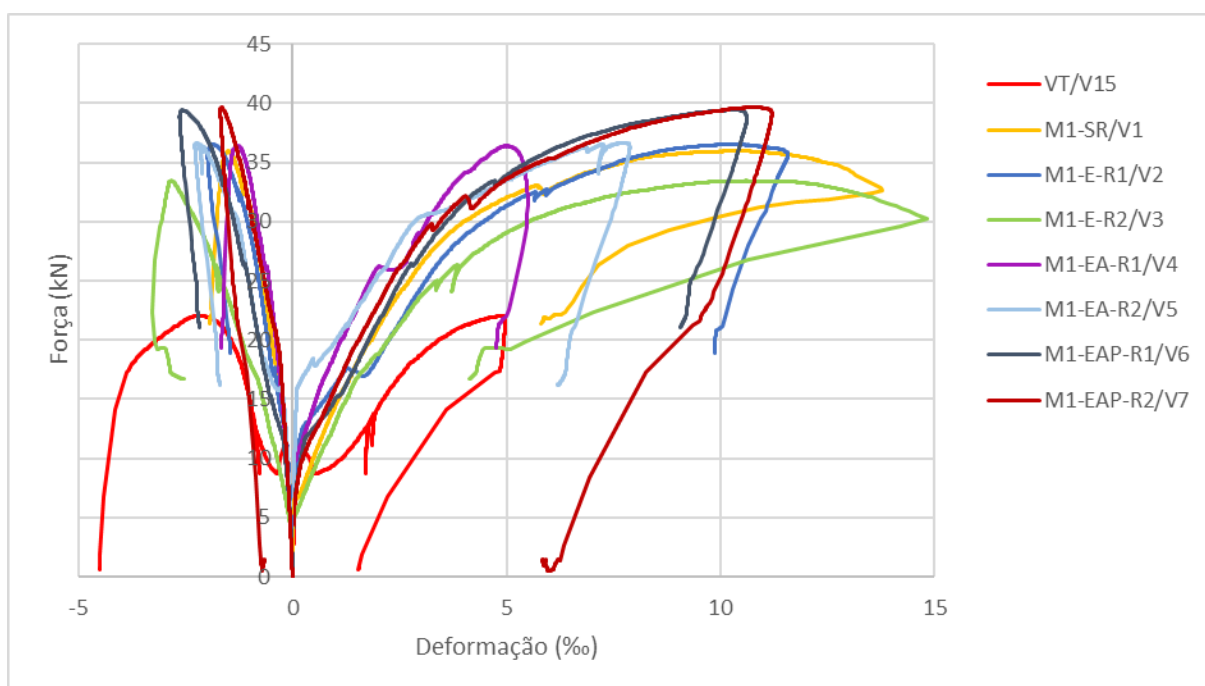


Figura 125 – Deformações específicas do aço e do concreto nas vigas de M1 (Fonte: Autor)

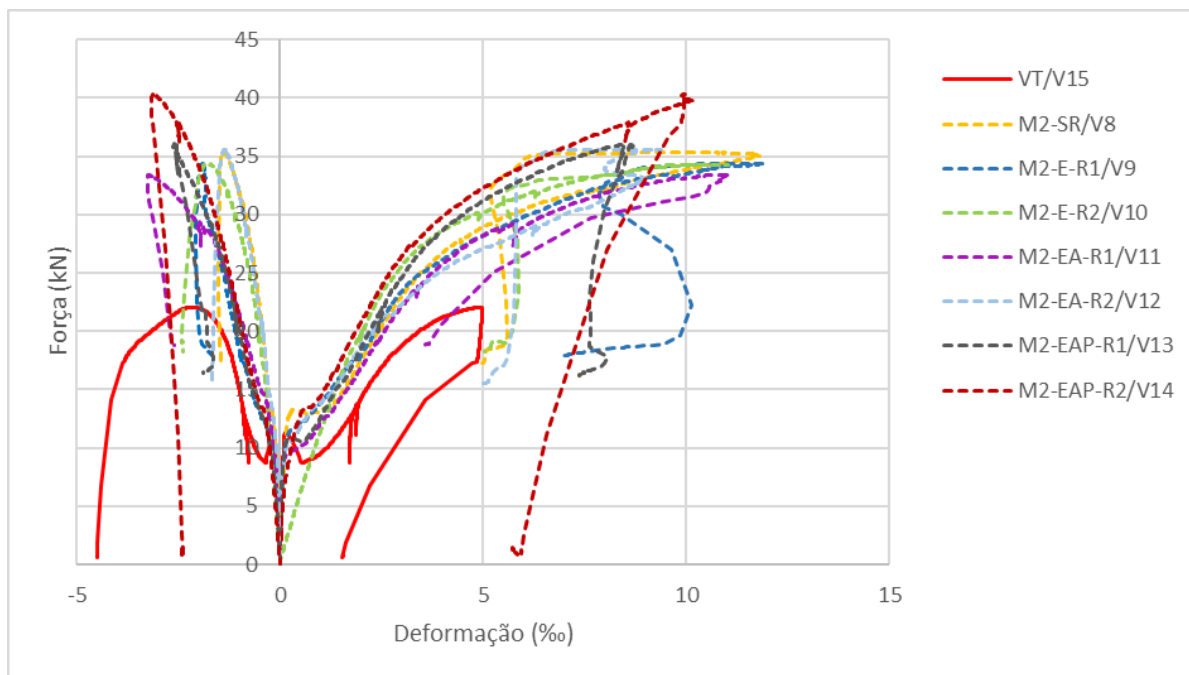


Figura 126 – Deformações específicas do aço e do concreto nas vigas de M2 (Fonte: Autor)

De modo geral, com exceção da viga M2-EAP-R1, observou-se comportamentos semelhantes de ruptura em todas as vigas. O processo de perda da capacidade resistente caracterizou-se pela formação de fissuras verticais ao longo do comprimento da viga, seguido da abertura significativa da fissura mais ao centro do vão, como mostrado na Figura 127 (a) e (b).



Figura 127 – Formação de fissuras (a) e de abertura da fissura central (b) (Fonte: Autor)

Na maioria dos exemplares não se identificou a ruptura do reforço, configurando falha de ancoragem (deslizamento do têxtil) na interface têxtil-matriz, como mostrado na Figura 128 (a). Nota-se que, ao ser visto pela fissura, os têxteis revestidos com epóxi encontram-se sem o revestimento ou com resquícios dele, indicando também o deslizamento, como pode ser visto na Figura 128 (b). Apenas na viga M2-EAP-R2 (V14) identificou-se a ruptura da malha, como mostrado na Figura 129.



Figura 128 – Ruptura por falha na ancoragem do têxtil no interior da matriz nas vigas V1 (a) e V2 (b) (Fonte: Autor)



Figura 129 – Ruptura das fibras na viga V14 (Fonte: Autor)

Quanto à viga M2-EAP-R1 (V13), verifica-se que a ruptura iniciou com o surgimento de uma fissura horizontal na interface matriz-substrato junto ao apoio de primeira ordem, como pode ser visto nas Figuras 130 (a) e (b). Com a progressão da carga, a desenvolvimento da fissura passou para a região de cobrimento da viga, na interface com as armaduras, caracterizando a ruptura por laminação do cobrimento, ou seja, pela falta de ancoragem do reforço.



Figura 130 – Ruptura por falta de ancoragem do reforço na viga V13 (Fonte: Autor)

Por fim, apesar de identificar-se o mesmo padrão de ruptura, percebe-se que todas as vigas reforçadas apresentaram deslocamentos verticais ligeiramente maiores que o da viga testemunho, entre 10 e 12 mm, aproximadamente.

As vigas M2-EAP-R1 e M2-EAP-R2, por exemplo, apresentaram deflexões de 15,31 mm e 14,05 mm, cerca de 88,31% e 72,82% maiores que a viga VT antes da ruptura. Nestes exemplares, embora os esforços atuantes tenham superado a aderência na interface têxtil-matriz, verifica-se a eficiência da ancoragem promovida pelo revestimento, uma vez que permitiu maior solicitação do têxtil e postergou o deslizamento. Este comportamento encontra-se de acordo com as pesquisas de Doninni et al. (2016) e Shipping (2013), cujos resultados dos ensaios de tração e arrancamento demonstraram aumento de resistência ao deslizamento na interface têxtil-matriz.

4.2.3.6 Deformação específica do têxtil

Para medir a deformação específica do têxtil, empregaram-se extensômetros no centro de um dos urdumes da última camada. Deste modo, foi possível acompanhar o comportamento do reforço até a ruptura do extensômetro ou da ligação, como apresentado na Figura 131.

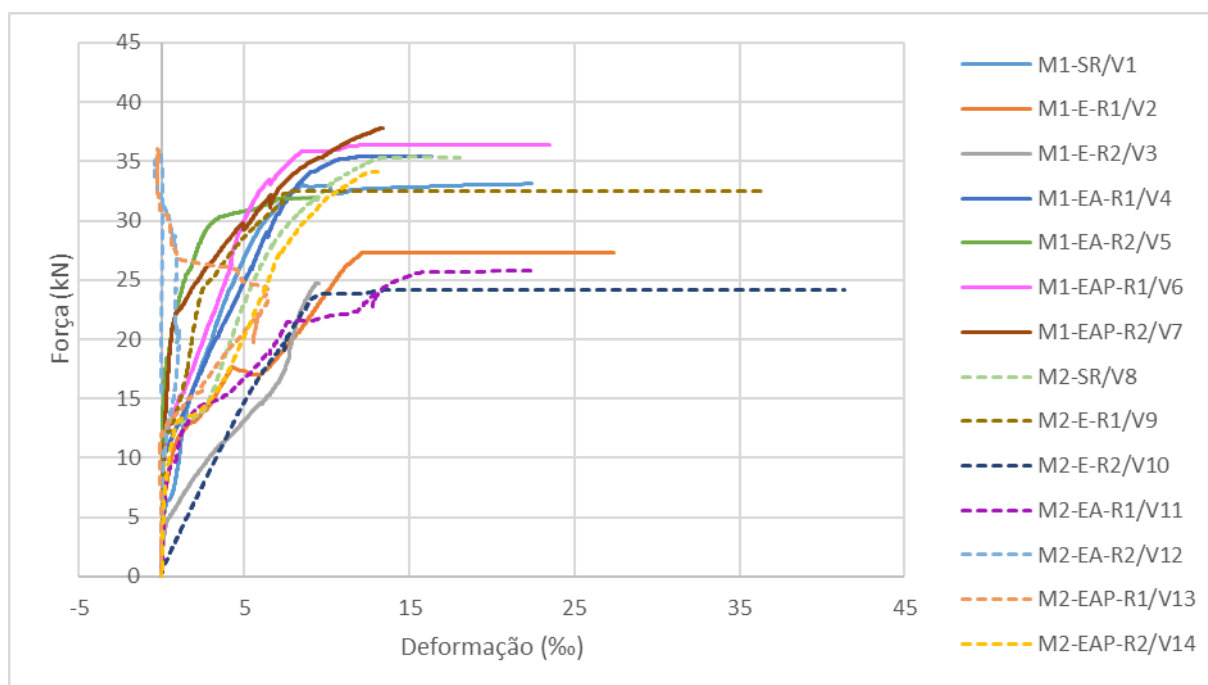


Figura 131 – Deformações específicas do têxtil (Fonte: Autor)

Com exceção das vigas M1-E-R2 e M2-E-R2, verifica-se que o têxtil somente apresentou deformações significativas para cargas superiores à 4,32 kN, que na análise numérica indica o início do processo de fissuração da matriz. Neste sentido, percebe-se a contribuição do reforço para o equilíbrio da seção.

De modo geral, observa-se que não há padrão no comportamento das curvas. Tal fato, pode ser atribuído, em parte, à distribuição não uniforme de resina e areia. Quanto às vigas M1/SR e M2/SR, contudo, mesmo sem revestimento, verifica-se que, no exemplar de M1 (argamassa industrializada), o reforço começou a ser solicitado mais significativamente para cargas acima de 13,2 kN, enquanto para M2 (argamassa autoadensável), a transferência de esforços ocorreu para cargas acima de 5,4 kN, aproximadamente, como pode ser verificado na Figura 132. Neste caso, pode-se supor que a composição de M1 tenha influenciado no comportamento do reforço.

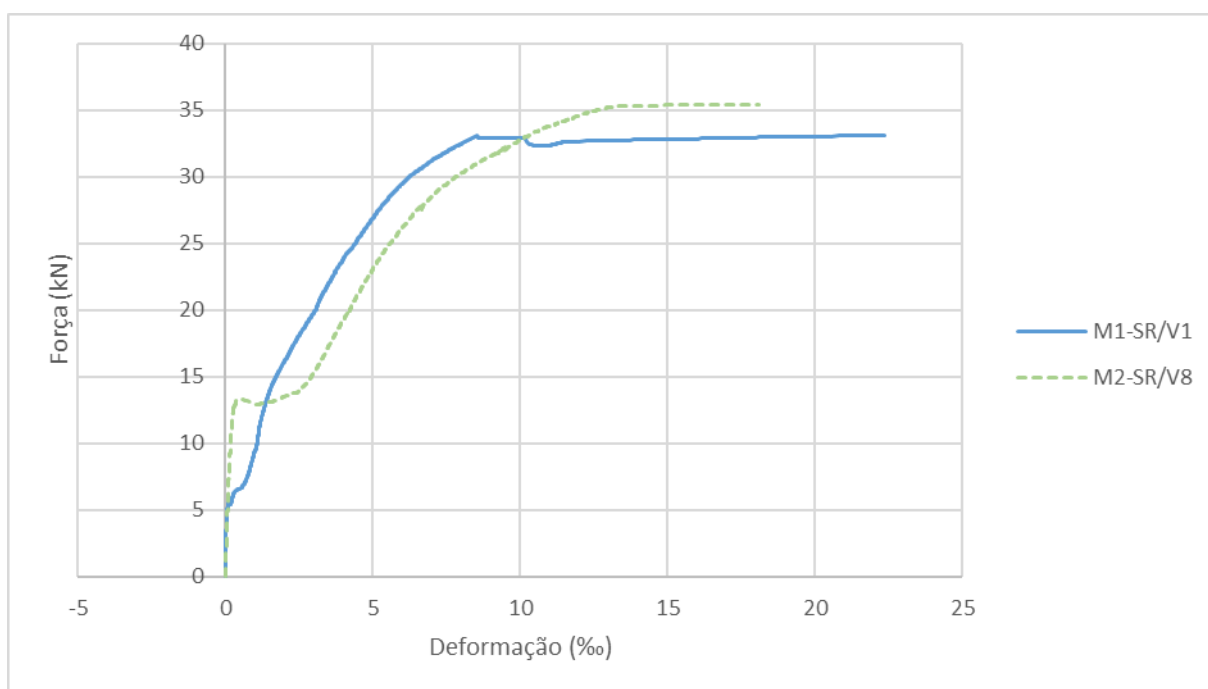


Figura 132 – Deformações específicas do têxtil das vigas V1 e V8 (Fonte: Autor)

Nos têxteis revestidos apenas com resina epóxi, observa-se maior variação no comportamento das curvas. As vigas M1-E-R1 e M2-E-R1 apresentaram deformações mais significativas para cargas acima de 10,0 kN, enquanto nas suas repetições, vigas M1-E-R2 e M2-E-R2, o têxtil deformou para cargas menores, como pode ser visto na Figura 133. Dentre os exemplares, as

vigas M2-E-R1 e M2-E-R2, apresentaram leitura das deformações até 36,73‰ e 41,37‰, respectivamente.

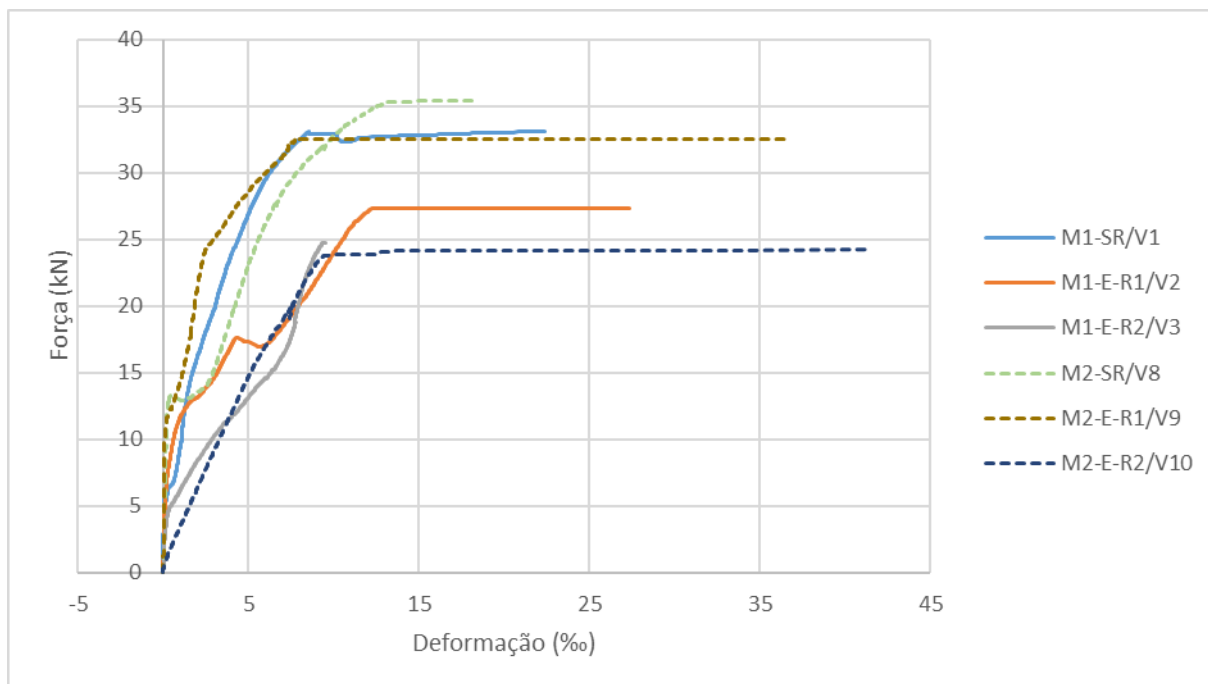


Figura 133 – Deformações específicas do têxtil das vigas V1, V2, V3, V8, V9 e V10 (Fonte: Autor)

Nas vigas com os têxteis totalmente revestidos de epóxi e areia, as deformações também não apresentaram comportamentos semelhantes, como mostrado na Figura 134. O têxtil da viga M1-EA-R1, apresentou deformação semelhante à da viga M2-SR, de 13‰, aproximadamente, para a carga de 35,4 kN. Na sua repetição, viga M1-EA-R2, o têxtil apresentou pouca deformação até próximo da carga de 16 kN. Embora não se tenha leitura dos extensômetros até final dos ensaios, verifica-se que, embora os têxteis tenham comportamentos distintos, a carga máxima resistida pelos exemplares M1-EA-R1 e M1-EA-R2 variou em 1,57%. Quanto a viga M2-EA-R2, observa-se ruptura precoce da ligação extensômetro-têxtil.

Nos exemplares com têxteis revestidos totalmente de epóxi e com areia somente nas extremidades, observa-se que o comportamento dos reforços apresentaram menor variação entre todos os exemplares, como pode ser visto na Figura 135. Apenas a viga M1-EAP-R2 apresentou solicitação tardia do urdume. Nas demais vigas, verifica-se que a solicitação do têxtil ocorreu de modo muito semelhante entre as cargas de 5,0 kN e 10,0 kN, aproximadamente.

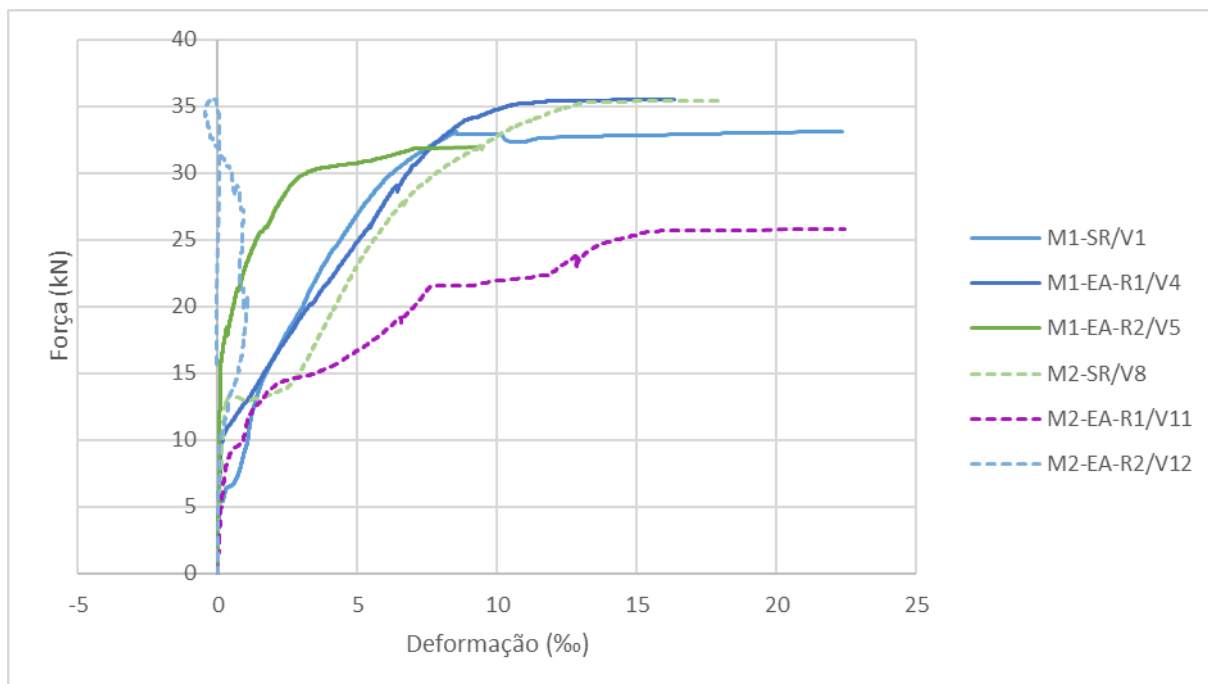


Figura 134 – Deformações específicas do têxtil das vigas V1, V4, V5, V8, V11 e V12 (Fonte: Autor)

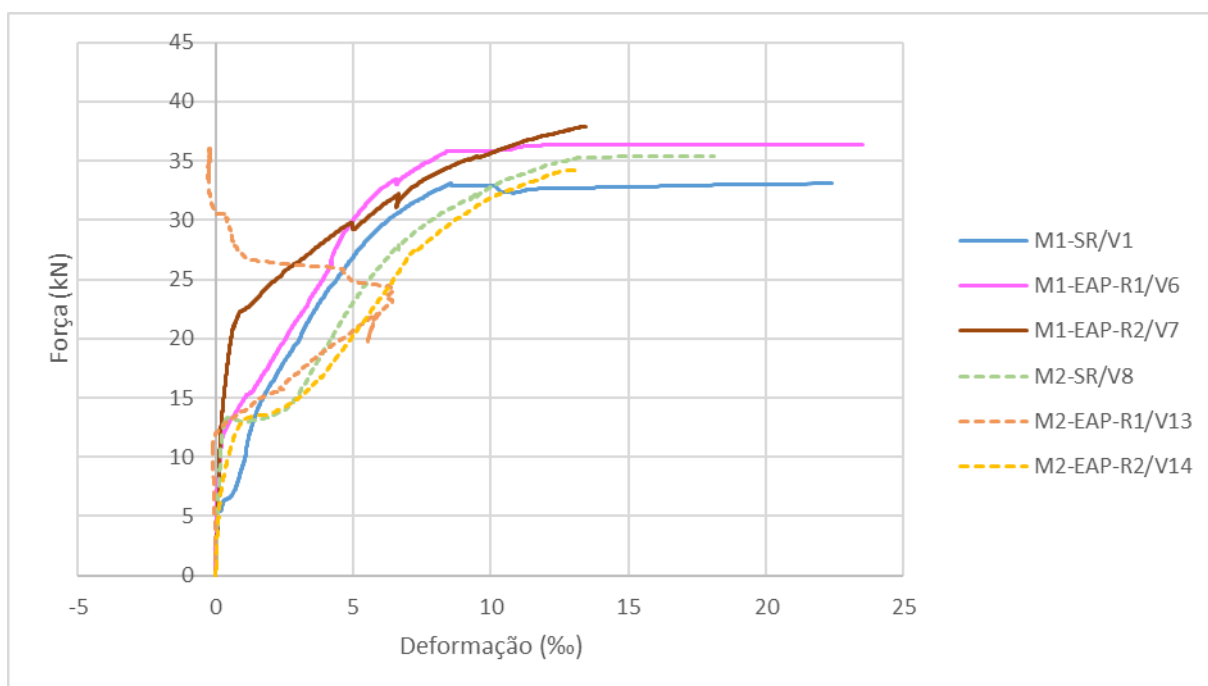


Figura 135 – Deformações específicas do têxtil das vigas V1, V6, V7, V8, V13 e V14 (Fonte: Autor)

A falta de padrão nas curvas de deformação específica dos têxteis pode estar relacionada a um conjunto de fatores que, combinados ou isolados, influenciam no comportamento mecânico

do material. Em relação ao processo de fabricação, tem-se fatores como a variação retilínea do malha, imperfeições geométricas, material impregnante não estrutural, entre outros.

No que tange ao processo de instrumentação, pode-se destacar a etapa de remoção da resina que mantém os filamentos unidos. A fim de se obter leituras mais precisas da deformação do têxtil, a retirada manual da resina pode danificar o urdume, comprometer o desempenho do reforço e, conseqüentemente, a aquisição dos dados. Isso vale, também, para a presença de resquícios do material impregnante. Pode-se destacar, ainda, variáveis de compatibilidade física e química entre a matriz e o reforço. Giese (2019) cita, também, o tipo de adesivo utilizado para fixação do extensômetro, a leitura pontual das deformações e a falta de protensão do têxtil como fatores que contribuem para o comportamento menos homogêneo do material.

4.2.3.7 Fator ductilidade

Com base na literatura, entende-se que vigas de concreto armado reforçadas externamente à flexão apresentam comportamento mecânico diferente de vigas não reforçadas. Dentre os diversos parâmetros que modificam a resposta do elemento estrutural, pode-se destacar a ductilidade, representada por meio de valores numéricos adimensionais, denominados de índice de ductilidade ou fator de ductilidade.

De modo geral, a ductilidade pode ser entendida como a medida da capacidade do material, seção, elemento ou sistema estrutural de experimentar deformações inelásticas (sem perda da capacidade resistente) antes da ruptura. Dentre outros métodos, o fator de ductilidade pode ser obtido pela relação entre os deslocamentos correspondentes à carga máxima (de ruptura) e à de escoamento do aço, como mostrado na Equação 11. A flecha de escoamento, por sua vez, foi determinada a partir do encontro de 2 retas auxiliares que caracterizam o comportamento do aço no estado elástico e plástico. Os resultados são apresentados na Tabela 39.

$$\mu_{\delta} = \frac{\delta_u}{\delta_y} \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

δ_u : corresponde à deflexão na carga de ruptura;

δ_y : corresponde à deflexão que caracteriza o início do escoamento da armadura longitudinal.

Referência	Flechas (mm)		Fator ductilidade	Média (coating)	Média (matriz)	Variação da ductilidade (%)
	Na ruptura	Escoamento do aço				
VT/V15	8,13	4,80	1,69	1,69	1,69	-
M1-SR/V1	9,97	5,70	1,75	1,75		3,24
M1-E-R1/V2	11,29	5,90	1,91	2,11		13,01
M1-E-R2/V3	13,83	6,00	2,31			36,09
M1-EA-R1/V4	10,33	5,20	1,99	2,15	2,13	17,29
M1-EA-R2/V5	10,63	4,60	2,31			36,44
M1-EAP-R1/V6	10,57	4,55	2,32	2,31		37,08
M1-EAP-R2/V7	9,80	4,25	2,31			36,09
M2-SR/V8	12,03	6,75	1,78	1,78		5,20
M2-E-R1/V9	11,80	6,80	1,74	1,75		2,44
M2-E-R2/V10	9,85	5,60	1,76			3,87
M2-EA-R1/V11	-	-	-	2,30	2,02	0,00
M2-EA-R2/V12	12,17	5,30	2,30			35,53
M2-EAP-R1/V13	15,31	6,90	2,22	2,27		30,99
M2-EAP-R2/V14	14,05	6,05	2,32			37,10

Tabela 39 – Comparativo entre os fatores de ductilidade das vigas (Fonte: Autor)

De modo geral, a partir da análise das deflexões, percebeu-se um aumento significativo dos fatores de ductilidade das vigas reforçadas em relação ao da viga testemunho. Como pode ser visto na Tabela 38, os fatores de ductilidade foram semelhantes para as vigas das matrizes M1 e M2. Comparando-se os resultados, verificam-se que os maiores aumentos estão nas vigas V3, V5, V6, V7, V12, V13 e V14, como ilustrado nas Figuras 136 e 137.

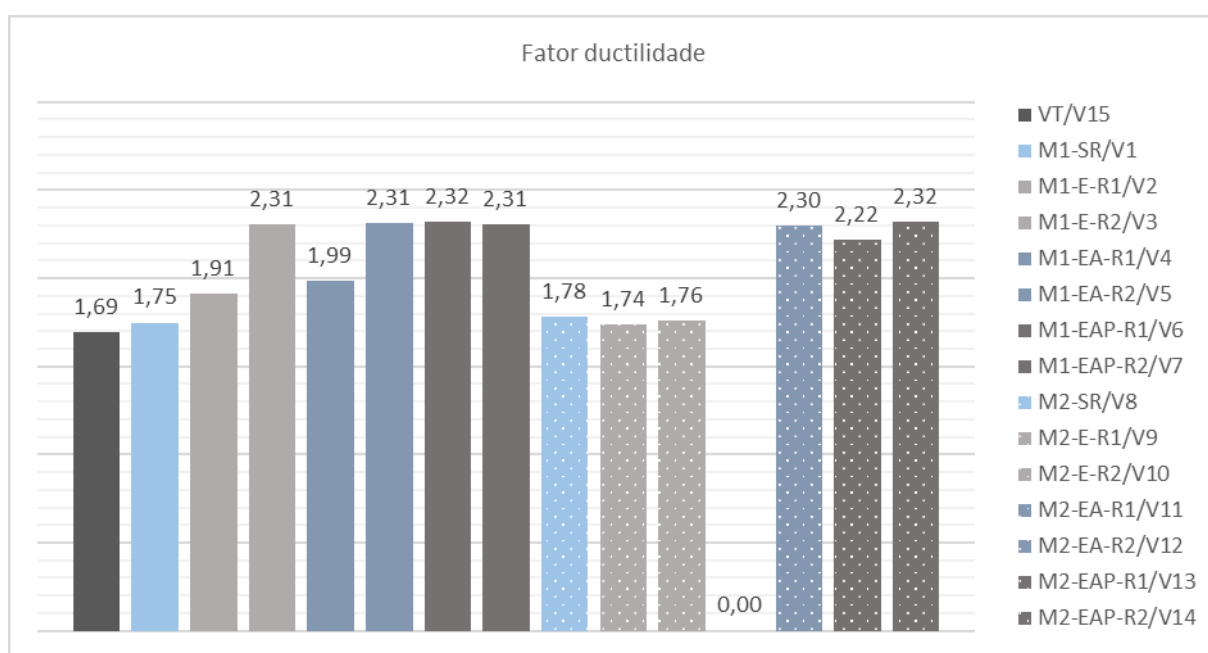


Figura 136 – Fatores de ductilidade das vigas do programa experimental (Fonte: Autor)

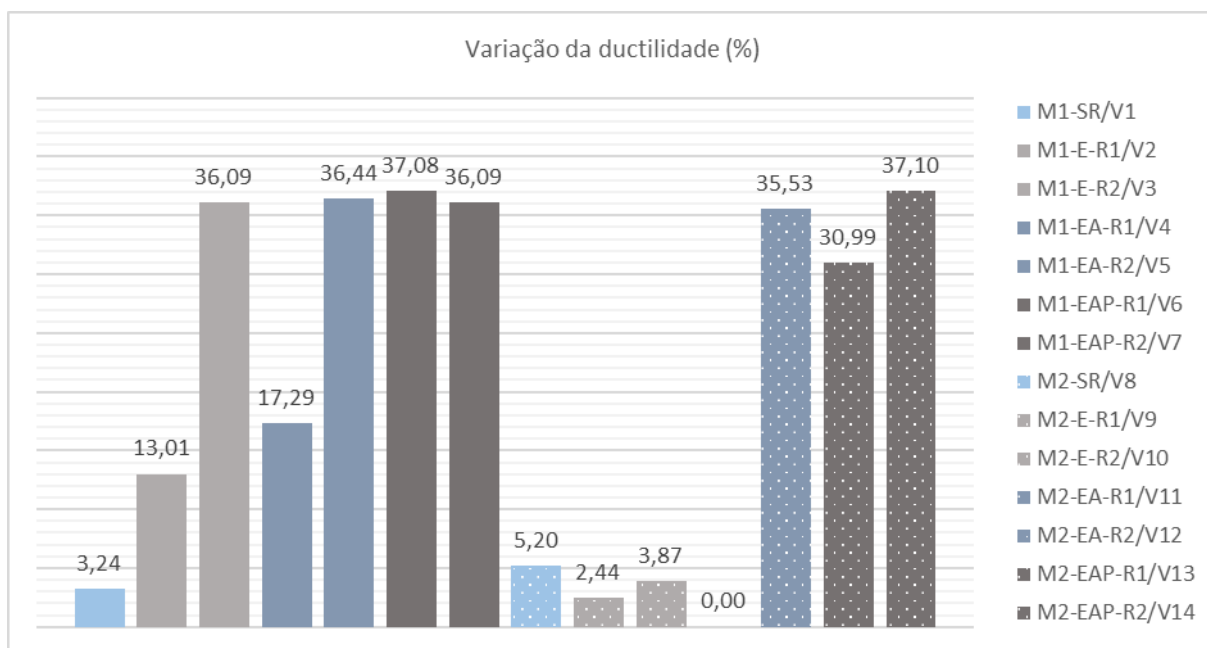


Figura 137 – Variação de ductilidade das vigas reforçadas em relação à VT (Fonte: Autor)

Sobre os resultados, verifica-se que as vigas com argamassa industrializada apresentaram um comportamento médio levemente mais dúctil do que as vigas com argamassa autoadensável, configurando, a variação de 5,16%, aproximadamente. Dentre os exemplares de M1, as vigas M1-E-R2, M1-EA-R2, M1-EAP-R1 e M1-EAP-R2 apresentaram aumentos significativos de ductilidade, com percentuais de 36,09%, 36,44%, 37,08% e 36,09%, respectivamente.

As repetições dos exemplares com epóxi e epóxi e areia, vigas M1-E-R1 e M1-EA-R1, contudo, não apresentaram o mesmo comportamento. As vigas M1-EA-R2, M1-EAP-R1 e M1-EAP-R2, por outro lado, apresentaram ótimos resultados. Pode-se atestar que o revestimento de areia nas extremidades das vigas somado à presença de epóxi proporciona maior ancoragem mecânica na interface têxtil-matriz. Para as vigas reforçadas com têxtil sem revestimento, os fatores de ductilidade se mantiveram próximos ao da viga testemunho, apresentando-se ligeiramente maior para o exemplar de M2 (5,2%) e menor para M1 (3,24%).

Quanto aos exemplares da argamassa autoadensável, pode-se atestar, também, aumento de ductilidade, com destaque para as vigas M2-EA-R2, M2-EAP-R1 e M2-EAP-R2, com comportamentos cerca de 35,53%, 30,99% e 37,10% mais dúcteis que a viga VT. Interessantemente, a viga M2-SR apresentou comportamento mais dúctil que as vigas VT e M1-SR. O exemplar M2-EA-R2 apresentou o segundo maior fator de ductilidade dentre os exemplares de M2, porém o seu comportamento não pôde ser comparado diretamente com a

sua repetição, uma vez que houve a perda dos dados, devido à problemas no sistema de fixação dos LVDTs.

Por fim, verifica-se que todas as vigas reforçadas apresentaram aumento de ductilidade, com resultados expressivos para os exemplares cujos têxteis foram revestidos totalmente com epóxi, mas com areia somente nas extremidades. Acerca das demais configurações, os resultados não podem ser conclusivos, uma vez que houve diferença significativa de comportamento entre as repetições.

4.2.3.8 Fator tenacidade

A tenacidade pode ser definida como a resistência mecânica de um material à fratura, quando submetido a deformações estáticas ou dinâmicas, ou seja, representa a capacidade do material de absorver energia até a ruptura. Dentre outras metodologias, a medida de tenacidade pode ser determinada a partir de ensaios de flexão, calculando-se a área abaixo da curva dos gráficos que relacionam força e deslocamento, como mostrado na Figura 138.

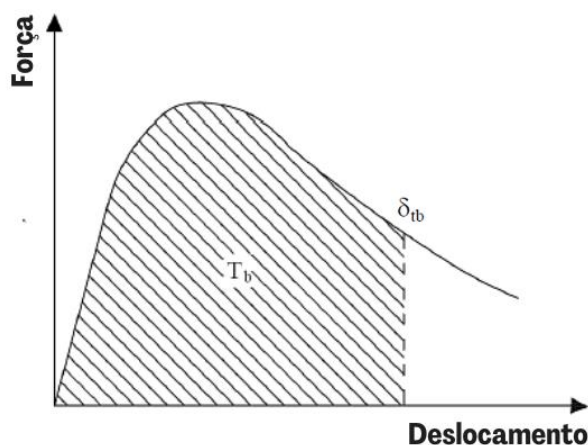


Figura 138 – Critério da JSCE-SF4 para o cálculo da tenacidade (Fonte: Adaptado de THE JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, 1984)

Para avaliar a tenacidade, os métodos adotam, geralmente, corpos de prova prismáticos e limite de deflexão de $l/150$. À vista disso, embora as vigas desta pesquisa tenham dimensões maiores que os corpos de prova normatizados, optou-se pela metodologia de cálculo sugerida pela JSCE-SF4: *Method of tests for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete* (THE JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, 1984) em que o fator de tenacidade, também chamado de resistência à flexão equivalente, pode ser obtido através da Equação 12.

$$FT = \frac{Tb}{\delta_{Tb}} \frac{L_v}{b_v h_v^2} \quad \text{Equação 12}$$

Sendo,

FT : fator de tenacidade ou resistência à flexão equivalente;

Tb : tenacidade à flexão (área sob a curva até o deslocamento equivalente de $l/150$);

δ_{Tb} : deslocamento equivalente a $l/150$;

L_v : comprimento do vão livre da viga;

b_v : largura da viga;

h_v^2 : altura da viga;

Por conseguinte, utilizando-se do *software* Autodesk AutoCAD na versão Estudante 2023 obteve-se os valores de tenacidade à flexão até o limite de deflexão de 9,33 mm, como exemplificado na Figura 139. Além disso, procurou-se investigar os valores de tenacidade à flexão e o fator de tenacidade atingidos pelas vigas no instante de ruptura. Os resultados podem ser verificados na Tabela 40 e na Figura 140.

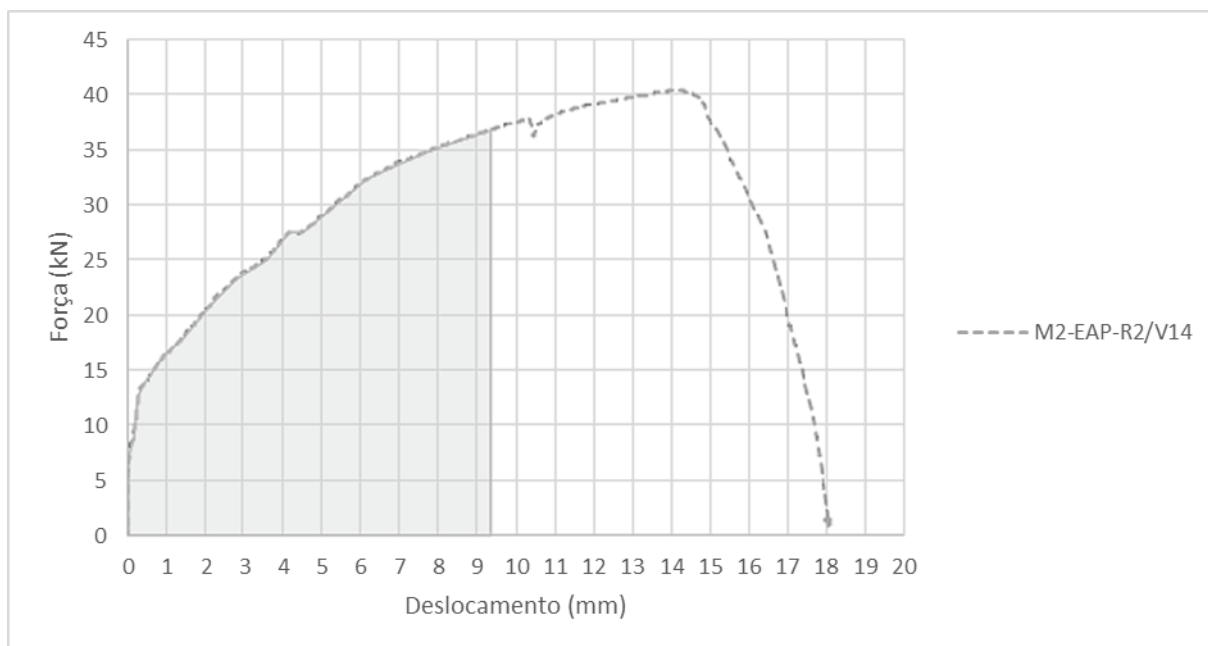


Figura 139 – Área sob a curva da força até o deslocamento de $l/150$ da viga V14 (Fonte: Autor)

Referência	Tenacidade à flexão (kN.mm)		Fator tenacidade (MPa)	
	<i>l/150</i>	<i>Na ruptura</i>	<i>l/150</i>	<i>Na ruptura</i>
VT/V15	168,13	138,06	5,26	4,95
M1-SR/V1	256,07	273,37	6,05	6,05
M1-E-R1/V2	250,40	317,50	5,92	6,20
M1-E-R2/V3	215,45	358,07	5,09	5,71
M1-EA-R1/V4	259,06	289,18	6,12	6,17
M1-EA-R2/V5	273,32	313,40	6,46	6,50
M1-EAP-R1/V6	283,60	326,45	6,70	6,81
M1-EAP-R2/V7	291,67	303,33	6,89	6,83
M2-SR/V8	226,39	314,38	5,35	5,76
M2-E-R1/V9	222,64	301,42	5,26	5,63
M2-E-R2/V10	241,27	253,39	5,70	5,67
M2-EA-R1/V11	-	-	-	-
M2-EA-R2/V12	236,38	329,53	5,59	5,97
M2-EAP-R1/V13	214,76	415,44	5,08	5,98
M2-EAP-R2/V14	263,13	443,23	6,22	6,96

Tabela 40 – Valores de tenacidade à flexão e fatores de tenacidade (Fonte: Autor)

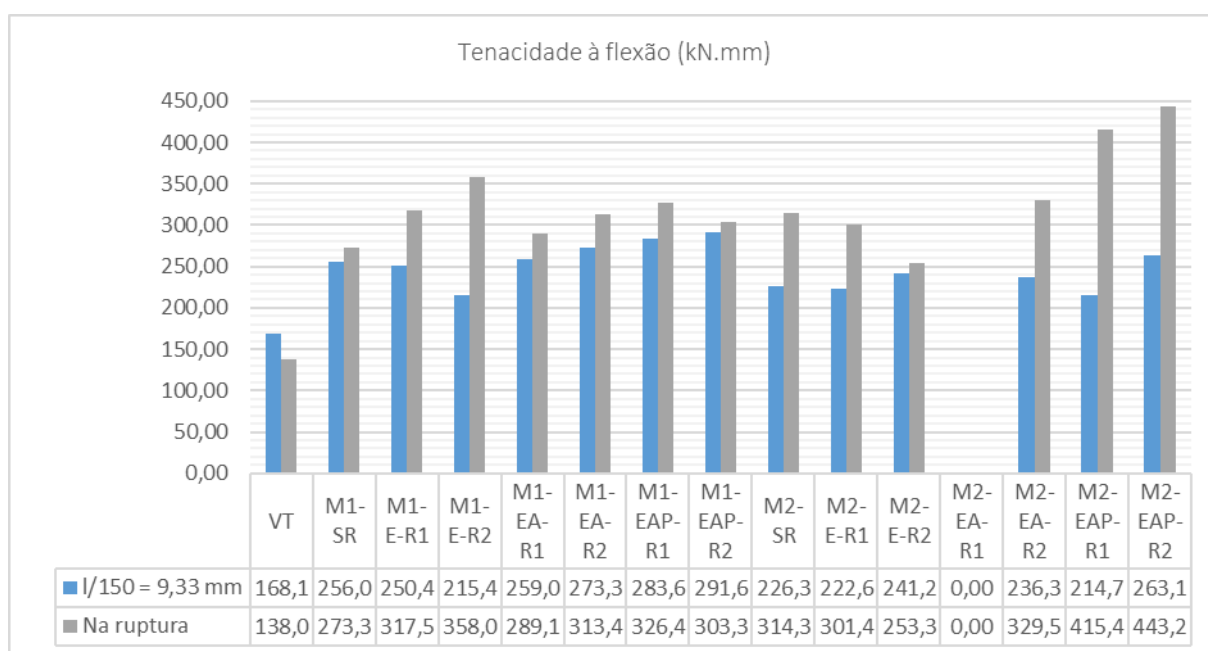


Figura 140 – Valores de tenacidade à flexão (Fonte: Autor)

A partir da análise dos dados, verifica-se que todas as vigas reforçadas apresentaram aumento de tenacidade em relação à viga testemunho. Os percentuais relativos ao acréscimo podem ser verificados na Figura 141.

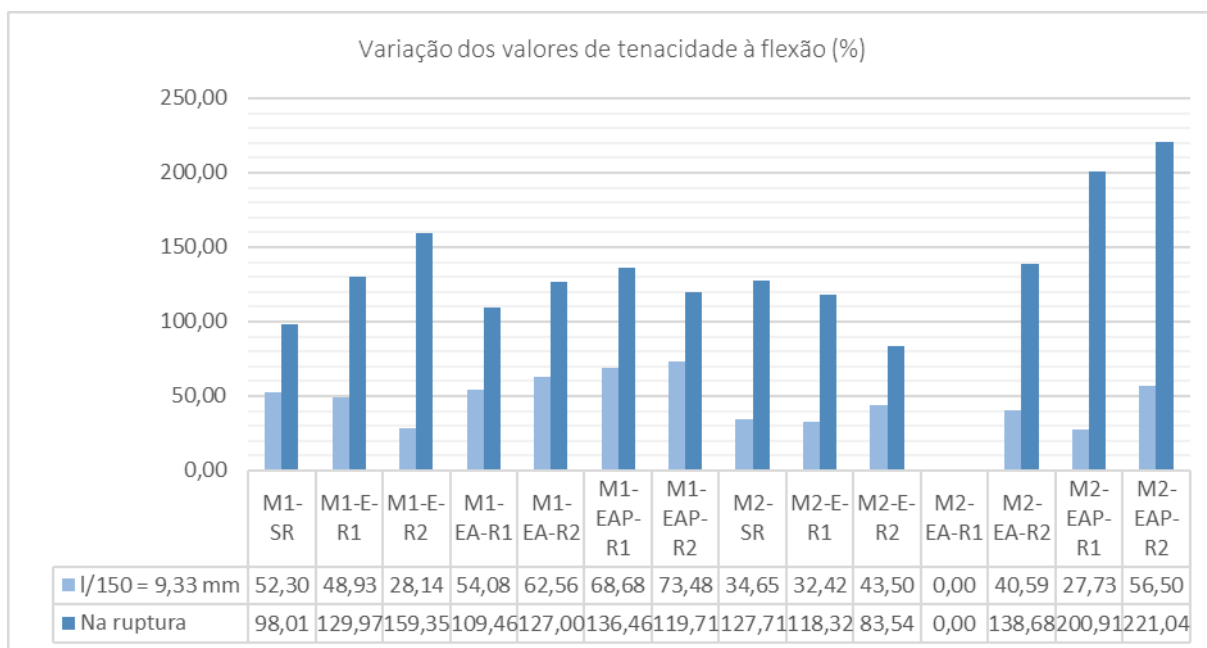


Figura 141 – Variação de tenacidade das vigas reforçadas em relação à VT (Fonte: Autor)

Para $l/150$, tem-se o aumento médio de 47,97%, com destaques para os exemplares M1-EAP-R1 (V6) e M1-EAP-R2 (V7), cujos percentuais atingiram 68,68% e 73,48%, respectivamente. Quanto à variação de tenacidade por matriz, identifica-se maior aumento médio nos exemplares de M1, com 55,45%, frente a 39,23% dos exemplares de M2.

Analisando-se os valores de tenacidade em vista da deflexão medida no instante de ruptura, verifica-se aumento médio de 136,17%, com destaque para os exemplares M2-EAP-R1 (V13) e M2-EAP-R2 (V14), cujos acréscimos foram de 200,91% e 221,04%, respectivamente. Tal fato pode ser observado por meio do alongamento das curvas da força em função do deslocamento. Pode-se ressaltar, também, que o exemplar M2-EAP-R2 (V14) apresentou a maior energia total absorvida e maior fator de tenacidade, sendo o único exemplar a apresentar de modo visível a ruptura do reforço.

Comparando-se os resultados por matriz, diferentemente do observado para $l/150$, verifica-se maior capacidade de absorção de energia nos exemplares de M2, com 148,37% de aumento médio, diante de 125,71% para M1. Supõem-se que a presença de pequenas fibras sintéticas na composição da argamassa industrializada contribuíram para o aumento de tenacidade para cargas mais baixas. Logo, observa-se que, além do revestimento, o tipo da matriz também influenciou na tenacidade.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, a partir da análise de resultados, apresentam-se as conclusões do programa experimental. Faz-se, também, sugestões para trabalhos futuros, à vista da continuidade dos estudos sobre o tema.

5.1 CONCLUSÕES

Por ser um compósito resultante da união entre uma matriz de cimento de granulometria fina e uma ou mais camadas de reticulados de fibras não metálicas, o concreto têxtil apresenta um comportamento mecânico que varia de acordo com as características e propriedades da fase matriz e da fase reforço e, principalmente, das ligações desenvolvidas entre elas. Uma vez aplicado na reabilitação de vigas de concreto armado, a aderência nas diferentes interfaces é essencial para o bom desempenho do elemento reforçado.

Nesta conjuntura, como objetivo geral desta pesquisa, buscou-se avaliar experimentalmente o comportamento mecânico de vigas de concreto armado reforçadas à flexão com concreto têxtil de fibra de vidro álcali-resistente de produção nacional. Para tanto, o programa experimental foi composto por 14 vigas reforçadas e 1 viga testemunho, totalizando 15 vigas. Investigaram-se as variáveis “tipo da matriz” e “revestimento do reforço ou *coating*” a partir do desempenho dos elementos submetidos ao ensaio de flexão a 4 pontos.

Para a análise dos resultados, procurou-se avaliar a capacidade resistente das vigas de forma analítica. Por possuir somente 1 exemplar de repetição, fez-se, também, a modelagem e a análise numérica da viga testemunho no do *software ANSYS Student 2022 R2*. Para a variável “tipo da matriz”, fez-se o reforço de 7 vigas com argamassa polimérica industrializada, denominada de matriz 1 (M1), e 7 vigas com argamassa autoadensável, definidas por matriz 2 (M2). Para a variável “revestimento do reforço”, trabalhou-se com 4 configurações diferentes: têxtil sem revestimento (SR), revestido com epóxi (E), totalmente revestido com epóxi e areia (EA) ou totalmente revestido com epóxi, mas com areia somente nas extremidades (EAP).

Quanto à previsão analítica, verificou-se que a carga de ruptura teórica da viga testemunho apresentou-se muito próxima das cargas obtidas na análise numérica e no ensaio experimental, apresentando coeficiente de variação de 0,85%. O desempenho teórico das vigas reforçadas também foi previsto, porém, desconsiderando a presença de resina epóxi e areia na interface têxtil-matriz. Para as vigas cuja fase reforço não foi revestida, os resultados mostraram concordância com análise teórica, variando de 0,36% no exemplar da matriz 1 e de -3,86% no exemplar da matriz 2.

Quanto às cargas máximas obtidas nos ensaios de flexão, verificou-se que todas as vigas reforçadas apresentaram aumentos significativos da capacidade resistente em relação à viga testemunho. Para as vigas da matriz 1, as cargas máximas revelaram aumentos entre 52,0% e 80,26%. Para os exemplares da matriz 2, os resultados foram semelhantes, variando de 51,84% a 83,24%, sendo que, em ambos os casos, os maiores percentuais foram observados nos exemplares cujos têxteis foram totalmente revestidos com resina epóxi, mas com areia somente nas extremidades. Em comparação à previsão teórica, o aumento de carga nestes elementos superou em até 31,71% o valor esperado.

Os exemplares revestidos somente com epóxi, por sua vez, apresentaram desempenhos abaixo do esperado. Atestou-se que a resina influenciou negativamente no desempenho do reforço, uma vez que 75% das amostras romperam para cargas menores que a prevista analiticamente. Do mesmo, o revestimento total de resina epóxi de areia parece ter sido prejudicial. Nestes elementos, o aumento esperado foi 63,20%, porém 75% das amostras (6 vigas) apresentaram cargas máximas inferiores. Apenas os exemplares da matriz 1 (2 vigas), cujos têxteis foram totalmente revestidos com epóxi e areia, apresentaram aumentos de 3,91% e 5,54% acima do esperado.

Ao contrário dos resultados observados nas demais configurações, a presença do revestimento de epóxi e de parcial de areia somente nas extremidades do têxtil parece ter contribuído significativamente para o aumento da capacidade resistente das vigas. Observou-se que 75% dos exemplares desta variável apresentaram aumentos que superaram em até 31,71% a previsão teórica. Por fim, verificou-se grande variabilidade de resultados de carga máxima entre exemplares de mesma configuração, contudo, observou-se que as maiores variações ocorreram nos exemplares totalmente revestidos com epóxi e areia, e as menores nos exemplares revestidos totalmente com epóxi e areia somente nas extremidades.

Quanto ao comportamento à flexão, assim como verificado na literatura, todas as vigas reforçadas apresentaram comportamento *deflection-hardening* com formação de múltiplas fissuras. Este comportamento caracteriza-se pelo aumento da capacidade resistida pelo elemento estrutural após a ruptura da matriz.

Acerca dos deslocamentos-limites, verificou-se que todas as vigas reforçadas apresentaram deflexões inferiores à da viga testemunho para a carga de 20 kN (próximo à carga de ruptura). Logo, verificou-se que o reforço, além de aumentar a capacidade do elemento estrutural, diminui as deflexões para cargas mais baixas.

A respeito das formas de ruptura, com exceção da viga V13, observou-se comportamentos semelhantes em todas as vigas. De modo geral, o processo de perda da capacidade resistente caracterizou-se pela formação de fissuras verticais ao longo do comprimento da viga, seguido da abertura significativa da fissura mais ao centro do vão. Na maioria dos exemplares não se identificou a ruptura do têxtil, configurando falha na interface têxtil-matriz (deslizamento). Apenas a V14 (M2-EAP-R2) apresentou ruptura parcial das fibras. Ademais, em relação às deflexões na ruptura, identificou-se que todas as vigas reforçadas apresentaram deslocamentos verticais superiores ao da viga testemunho, com valores de deflexões até 88,31% maiores. Logo, embora os esforços atuantes tenham superado a aderência na interface têxtil-matriz, atestou-se a eficiência da ancoragem promovida pelos tratamentos do reforço, uma vez que permitiu maior solicitação do têxtil, postergando o deslizamento.

Quanto à ductilidade, verificou-se que todas as vigas reforçadas apresentaram comportamento mais dúctil que a viga testemunho, com resultados expressivos para os exemplares cujos têxteis foram revestidos totalmente com epóxi, mas com areia somente nas extremidades (EAP), atingindo cerca de 37,10% de aumento máximo e 35,31% em média. Acerca das demais configurações, têxteis revestidos com epóxi (E) e epóxi e areia (EA) os resultados não podem ser conclusivos, uma vez que houve diferença significativa de comportamento entre as repetições. Conclui-se que há a necessidade de mais ensaios para atestar as vantagens do procedimento.

Sobre o fator de tenacidade, verificou-se que todas as vigas reforçadas apresentaram aumento da energia de ruptura em relação à viga testemunho. Para a deflexão limite de $l/150$, obteve-se aumento médio de 47,97%, com percentuais maiores nos exemplares de M1. Para a deflexão

de ruptura, por sua vez, verificou-se aumento médio de 136,17%, com destaque para os exemplares de M2.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O concreto têxtil abre novas possibilidades para a construção civil. Porém, por ser um material relativamente novo, inexistente ainda um órgão ou norma regulamentadora que uniformize os processos de fabricação e de aplicação do material, o que provoca diferenças quanto às suas características e propriedades, dificultando o seu emprego. Por conseguinte, muito trabalho deve ser feito para que o concreto têxtil seja amplamente conhecido, aceito e usado como material de construção.

À vista disso, propõe-se alguns temas de pesquisa que buscam continuar e complementar o assunto apresentado nesta dissertação:

- a) Estudo das matrizes de cimento com foco na compatibilidade química e durabilidade dos têxteis;
- b) Análise do comportamento mecânico de têxteis revestidos por diferentes materiais;
- c) Desenvolvimento de técnicas para execução do reforço em vigas na posição natural e sob aplicação de carga;
- d) Realizar modelagem numérica para diferentes configurações de reforço, considerando a presença de revestimento, e comparar com resultados experimentais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AJDUKIEWICZ, A.; KOTALA, B.; WEGŁORZ, M. **Concept and practical applications of textile reinforced concrete**. Structural Analysis of Historical Constructions, Poland, 2012, p. 760-766.

ALDEA, C.; GRIES, T.; ROYE, A. *Definitions*. In: BRAMESHUBER, W. (Ed.). **Textile Reinforced Concrete - State-of-the-Art Report of RILEM TC 201-TRC**. RILEM Publications SARL, 2006. p. 5-9.

ARAÚJO, M. F. S. B. **Simulação pelo método dos elementos finitos de peças em concreto têxtil**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15823: Concreto autoadensável Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco**. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15575: Edificações habitacionais - Desempenho**. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12655: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 11768: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9062: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado**. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8522: Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação Parte 1: Módulos estáticos à compressão**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7480: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado - Especificação**. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2016.

BÄHR, L. **Mechanical behavior and numerical modeling of textile reinforced concrete**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

BEBER, A. J. **Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fiber Reinforced Cementitious Composites**. Taylor & Francis, 2ª ed., 2007.

BEUSHAUSEN, H. **The influence of concrete substrate preparation on overlay bond strength**. Magazine of Concrete Research, v. 62, n. 11, 2010, p. 845-852.

BISBY, L. *Fire resistance of textile fiber composites used in civil engineering*. In: TRIANTAFILLOU, T. C. (Ed.). **Textile Fibre Composites in Civil Engineering**. Woodhead Publishing, 2016, p. 169-185.

BOURNAS, D. A.; LONTOU, P. V.; PAPANICOLAOU, C. G.; TRIANTAFILLOU, T. C. **Textile Reinforced Mortar versus Fiber-Reinforced Polymer Confinement in Reinforced Concrete Columns**. 2007. ACI Structural Journal, v. 104, n. 6, p. 740-748.

BRAMESHUBER, W. *Manufacturing methods for textile-reinforced concrete*. In: TRIANTAFILLOU, T. C. (Ed.). **Textile Fibre Composites in Civil Engineering**. Woodhead Publishing, 2016, p. 45-59.

BRAMESHUBER, W.; BROCKMANN, T.; CURBACH, M.; MEYER, C.; VILKNER, G.; MOBASHER, B.; PELED, A.; REINHARDT, H. W.; KRÜGER, M.; WASTIELS, J. *Concrete/Matrix*. In: BRAMESHUBER, W. (Ed.). **Textile Reinforced Concrete - State-of-the-Art Report of RILEM TC 201-TRC**. RILEM Publications SARL, 2006. p. 29-56.

BRESCOVIT, S. J. **Avaliação da durabilidade de painéis de concretos têxteis com utilização de telas de fibras de vidro resistente aos álcalis do cimento**. 2021. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos), São Leopoldo.

BROCKMANN, T. **Mechanical and Fracture Mechanical Properties of Fine Grained Concrete for Textile Reinforced Composites**. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia), RWTH Aachen University, Aachen.

BRUCKERMANN, O. **Zur Modellierung des Zugtragverhaltens von textilbewehrtem Beton**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia), RWTH Aachen University, Aachen.

BÜTTNER, T. F. **Zur Dauerhaftigkeit polymergetränkter AR-Glas Bewehrungen in Textilbeton**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia), RWTH Aachen University, Aachen.

BÜTTNER, T. F.; RAUPACH, M. **Dauerhaftigkeit polymergetränkter AR-Glas-Bewehrungen in Beton - Materialauswahl und Lebensdauer-prognose**. Beton und Stahlbetonbau, n. 108, 2013, p. 22-33.

CALLISTER Jr., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. LTC, 9ª ed., Rio de Janeiro, 2016.

COMPANHIA NACIONAL DE CIMENTOS (CNC). **Ficha de informações de segurança de produtos químicos - FISPQ**. Ficha técnica. Disponível em https://cimentonacional.com.br/public/documentos/fispq_sete_lagoas.pdf. CNC, 2018. Acesso em 27/09/2022.

COURARD, L.; PIETROWSKI, T.; GARBACZ, A. **Near-to-Surface properties affecting bond streng in concrete repair**. Cement & Concrete Composites, v. 46, 2013, p. 73-80.

DALAZEN, C. D. **Reforço à flexão de vigas em concreto armado com a utilização de argamassa reforçada com têxteis de carbono e de vidro**. 2021. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia dos Materiais) - Programa de Pós-Graduação em Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre.

DENARDI, A. **Concreto têxtil: uma revisão bibliográfica sobre desenvolvimentos, aplicações e perspectivas de estudos e empregos no Brasil**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre.

DONNINI, J.; CORINALDESI, V. **Mechanical characterization of different FRCM systems for structural reinforcement**. Construction and Building Materials, v. 145, 2017, p. 565-575.

DONNINI, J.; CORINALDESI, V.; NANNI, A. **Mechanical properties of FRCM using carbon fabrics with different coating treatments**. Composites Part B: Engineering, v. 88, 2016, p. 220-228.

DONNINI, J.; DE CASO Y BASALO, F.; CORINALDESI, V.; LANÇIONI, G.; NANNI, A. **Fabric-reinforced cementitious matrix behavior at high-temperature: experimental and numerical results**. Composites Part B: Engineering, v. 108, 2017, p. 108-121.

DVORKIN, D.; PELED, A. **Effect of reinforcement with carbon fabrics impregnated with nanoparticles on the tensile behavior of cement-based composites.** *Cement and Concrete Research*, v. 85, 2016, p. 28-38.

ELSANADEDY, H. M.; ALMUSALLAM, T. H.; ALSAYED, S. H.; AL-SALLOUM, Y. A. **Flexural strengthening of RC beams using textile reinforced mortar - Experimental and numerical study.** *Composite Structures*, v. 97, 2013, p. 40-55.

GCP APPLIED TECHNOLOGIES INC. **ADVA®.** Folha de dados do produto. Disponível em <https://gcpat.com.br/pt-br/solutions/products/adva-high-range-water-reducers/adva>. GCP Applied Technologies Inc., 2022. Acesso em 26/09/2022.

GIESE, A. C. H. **Utilização de argamassa reforçada com têxtil de fibra de vidro álcali resistente para reforço à flexão de vigas de concreto armado.** 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

GRIES, T.; RAINA, M.; QUADFLIEG, T.; STOLYAROV, O. *Manufacturing of textiles for civil engineering applications.* In: TRIANTAFILLOU, T. C. (Ed.). **Textile Fibre Composites in Civil Engineering.** Woodhead Publishing, 2016, p. 3-24.

GRIES, T.; ROYE, A.; OFFERMANN, P.; PELED, A. *Textiles.* In: BRAMESHUBER, W. (Ed.). **Textile Reinforced Concrete - State-of-the-Art Report of RILEM TC 201-TRC.** RILEM Publications SARL, 2006. p. 11-27.

GRIES, T.; VEIT, D.; WULFHORST, B. **Textile Technology: An Introduction.** Hanser Publications, 2^a ed., Munich, 2015.

GRINGS, K. J. O. **Compósitos cimentícios têxteis reforçados com resíduo de vestuário.** 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos), São Leopoldo.

HANISCH, V.; KOLKMANN, A.; ROYE, A.; GRIES, T. **Influence of machine settings on mechanical performance of yarn and textile structures.** 1st International Conference Textile Reinforced Concrete (ICTRC), Aachen, 2006, p. 13-22.

HARTIG, J. U. **Numerical investigations on the uniaxial tensile behaviour of Textile Reinforced Concrete.** 2011. Tese (Doutorado em Engenharia), Technische Universität Dresden - TU Dresden, Dresden.

HEGGER, J.; WILL, N.; BENTUR, A.; CURBACH, M.; JESSE, F.; MOBASHER, B.; PELED, A.; WASTIELS, J. *Composite materials - Mechanical behaviour of textile reinforced concrete.* In: BRAMESHUBER, W. (Ed.). **Textile Reinforced Concrete - State-of-the-Art Report of RILEM TC 201-TRC.** RILEM Publications SARL, 2006, p. 133-186.

HEGGER, J.; WILL, N.; BRUCKERMANN, O.; VOSS, S. **Load-bearing behaviour and simulation of textile reinforced concrete.** *Materials and Structures*, v. 39, n. 8, 2006, p. 765-776.

HERAKOVICH, C. T. **Mechanics of Fibrous Composites.** John Wiley & Sons, Inc., 1998.

HULL, D.; CLYNE, T.W. **An introduction to composite materials.** Cambridge University Press, 2^a ed., 1996.

JESSE, F.; CURBACH, M. *Chapter VII: Verstärken mit Textilbeton.* In: BERGMEISTER, K.; FINGERLOOS, F.; WÖRNER, J. D. (Ed.). **Beton-Kalender Beton-Kalender 2010: Brücken, Betonbau im Wasser.** Ernst & Sohn, 2009, p. 457-565.

JO, M.; KIM, H.; LEE, Y.; KIM, D.; KIM, K. **Evaluation of mechanical properties and flexural behavior of FRCM system composed of different types of textile grid and AL powder.** *Construction and Building Materials*, v. 323, 2022, p. 1-14.

JÚLIO, E. N. B. S.; BRANCO, F. A. B.; SILVA, V. D. **Concrete-to-concrete bond strength. Influence of the roughness of the substrate surface.** *Construction and Building Materials*, v. 18, 2004, p. 675-681.

KOCH, A.; KERSCHL, C.; GRIES, T.; BRAMESHUBER, W. **Locally adapted biaxial warp knitted textiles as reinforcement of folded concrete elements.** 11th International Symposium on Ferrocement and 3rd International Conference on Textile Reinforced Concrete (ICTR). RILEM Publications SARL, 2015, p. 419-426.

KOLKMANN, A.; ROYE, A.; GRIES, T. **Warp knitting technology for reinforcing fabrics in specific zones: the possibilities for 2D and 3D textiles.** *Kettenwirk-Praxis* v. 39, n. 4, 2005.

KOUTAS, L. N.; TETTA, Z.; BOURNAS, D. A.; TRIANTAFILLOU, T. C. **Strengthening of Concrete Structures with Textile Reinforced Mortars: State-of-the-Art Review.** *Journal of Composites for Construction*, v. 23, n. 1, 2019.

KRÜGER, M.; REINHARDT, H.W. *Fire resistance.* In: BRAMESHUBER, W. (Ed.). **Textile Reinforced Concrete - State-of-the-Art Report of RILEM TC 201-TRC.** RILEM Publications SARL, 2006. p. 211-219.

KULAS, C. H. **Actual applications and potential of textile-reinforced concrete.** GRC 2015 Congress Dubai. Dubai, 2015.

KULAS, C. **Textile Reinforced Concrete: The usage of non-metallic reinforcements for concrete structures.** Solidian, 2015.

KULAS, C. H. **Zum Tragverhalten getränkter textiler Bewehrungselemente für Betonbauteile.** 2013. Tese (Doutorado em Engenharia), RWTH Aachen University, Aachen.

LARRINAGA, P.; GARMENDIA, L.; CHASTRE, C.; SAN-JOSÉ, J. T. **Low-grade RC beams strengthened with TRM composite based on basalt, carbon and steel textiles: experimental and analytical study.** Case Studies in Construction Materials, v. 16, 2022, p. 1-20.

LIEBOLDT, M.; BUTLER, M.; MECHTCHERINE, V. *Application of Textile-Reinforced Concrete (TRC) in prefabrication.* In: GETTU, R. (Ed.). **Seventh International RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concrete: Design and Applications.** RILEM Publications SARL, 2008, p. 253-262.

MANDOR, A.; EL REFAI, A. **Flexural response of reinforced concrete continuous beams strengthened with fiber-reinforced cementitious matrix (FRCM).** Engineering Structures, v. 251, 2022, p. 1-12.

MC-BAUCHEMIE BRASIL. **Linha de Produtos 2020.** Ficha técnica. Disponível em <https://www.mc-bauchemie.com.br/downloads/>. MC-BAUCHEMIE BRASIL, 2020. Acesso em 24/08/2021.

MC-BAUCHEMIE BRASIL. **MC-PowerFlow 4000.** Ficha técnica. Disponível em <https://www.mc-bauchemie.com.br/downloads/>. MC-BAUCHEMIE BRASIL, 2022. Acesso em 18/06/2022.

MECHTCHERINE, V. **Novel cement-based composites for the strengthening and repair of concrete structures.** Construction and Building Materials, v. 41, 2013, p. 365-373.

MECHTCHERINE, V.; SCHNEIDER, K.; BRAMESHUBER, W. *Mineral-based matrices for textile-reinforced concrete.* In: TRIANTAFILLOU, T. C. (Ed.). **Textile Fibre Composites in Civil Engineering.** Woodhead Publishing, 2016, p. 25-43.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete - Microstructure, Properties, and Materials.** MC Graw-Hill Education, 4^a ed., 2014.

MOBASHER, B. **Mechanics of fiber and textile reinforced cement composites.** CRC Press, London, 2012.

MORASSUTTI, D. S. **Passarela em concreto armado e concreto têxtil: comparativo entre metodologias de dimensionamento.** 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre.

MORGAN, R. J.; ALLRED, R. E. *Aramid fiber reinforcements.* In: LEE, S. M. (Ed.). **Reference Book for Composites Technology.** Technomic Publishing Company, Lancaster, v. 1, 1989.

NAAMAN, A. E. **High performance fiber reinforced cement composites: classification and applications.** CBM-CI International Workshop, Karachi, Pakistan, 2003, p. 389-401.

NAAMAN, A. E.; REINHARDT, H. W. **Proposed classification of HPFRC composites based on their tensile response.** *Materials and Structures*, v. 39, n. 5, 2006, p. 547-555.

NORA, J. **Análise experimental do Concreto Têxtil como reforço à flexão de vigas de concreto armado.** 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre.

OMBRES, L. **Flexural analysis of reinforced concrete beams strengthened with a cement based high strength composite material.** *Composite Structures*, v. 94, n. 1, 2011, p. 143-155.

ORTOLAN, V. K. **Estudo de matriz cimentícia reforçada com fibra têxtil para uso em painéis.** 2021. Tese. (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos), São Leopoldo.

ORTOLAN, V. K.; MANCIO, M.; TUTIKIAN, B. F. **Evaluation of the influence of the pH of concrete pore solution on the corrosion resistance of steel reinforcement.** *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, v. 1, n. 1, 2016, p. 1-7.

PELED, A.; MOBASHER, B. **Pultruded fabric-cement composites.** *ACI Materials Journal*, v. 102, 2005, p. 15-23.

PELED, A.; MOBASHER, B.; BENTUR, A. **Textile Reinforced Concrete.** CRC Press, London, 2017.

PORTAL, N. W.; LUNDGREN, K.; WALLBAUM, H.; MALAGA, K. **Sustainable Potential of Textile-Reinforced Concrete.** *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 27, n. 7, 2015, p. 1-12.

QINGHUA, L.; SHILANG, X. **Experimental Research on Mechanical Performance of Hybrid Fiber Reinforced Cementitious Composites with Polyvinyl Alcohol Short Fiber and Carbon Textile.** *Journal of Composite Materials*, v. 45, n. 1, 2011, p. 5-28.

RAMBO, D. A. S. **Efeito da temperatura no comportamento mecânico de compósitos refratários reforçados com tecidos de basalto e carbono.** 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

RAOOF, S. M.; BOURNAS, D. A. **Bond between TRM versus FRP composites and concrete at high temperatures.** *Composites Part B: Engineering*, v. 127, 2017, p. 150-165.

RAUPACH, M.; ORLOWSKY, J.; BÜTTNER, T.; DILTHEY, U.; SCHLESER, M. **Epoxy-impregnated textiles in concrete - load bearing capacity and durability.** 1st International Conference on Textile Reinforced Concrete (ICTR). RILEM Publications SARL, 2006, p. 77-88.

REGINATO, L. A. **Avaliação experimental dos efeitos da corrosão em concreto armado: diagnóstico e reabilitação com UHPFRC e concreto têxtil.** 2020. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre.

REINHARDT, H. W.; KRÜGER, M.; BENTUR, A.; BRAMESHUBER, W.; BANHOLZER, B.; CURBACH, M.; JESSE, F.; MOBASHER, B.; PELED, A.; SCHORN, H. *Composite Materials: Bond.* In: BRAMESHUBER, W. (Ed.). **Textile Reinforced Concrete - State-of-the-Art Report of RILEM TC 201-TRC.** RILEM Publications SARL, 2006. p. 83-131.

ROYE, A. **Hochleistungsdoppelaschelprozess für Textilbetonanwendungen.** 2007. Tese (Doutorado em Engenharia), RWTH Aachen University, Aachen.

SHIPING, Y.; SHILANG, X.; HEDONG, L. **Improved Mechanical Properties of Textile Reinforced Concrete Thin Plate.** China Academic Journal Electronic Publishing Houde. Wuhan University of Technology and Springer Verlag Berlin Heidelberg, v. 28, n. 1, 2013, p. 92-98.

SIKA. **Ficha Técnica de Produto Sikadur®-32.** Versão 01.01, 2019.

SIM, J.; PARK, C.; MOON, D. Y. **Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures.** Composites Part B: Engineering, v. 36, n. 6-7, 2005, p. 504-512.

SCHEERER, S.; SCHLADITZ, F.; CURBACH, M. **Textile Reinforced Concrete - From the Idea to a High Performance Material.** 3rd International Conference on Textile Reinforced Concrete (ICTR). RILEM Publications SARL, 2015, p. 15-33.

SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto.** PINI, São Paulo, 1ª ed., 1998.

TECNOSIL. **Sílica ativa.** Ficha técnica. Disponível em <https://www.tecnosilbr.com.br/silica-ativa>. Grupo Tecnosil, 2022. Acesso em 27/09/2022.

THE JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **JSCE-SF4: Method of tests for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete.** Concrete library of JSCE, Part III-2 Method of tests for steel fiber reinforced concrete, n. 3, 1984, p. 58-61.

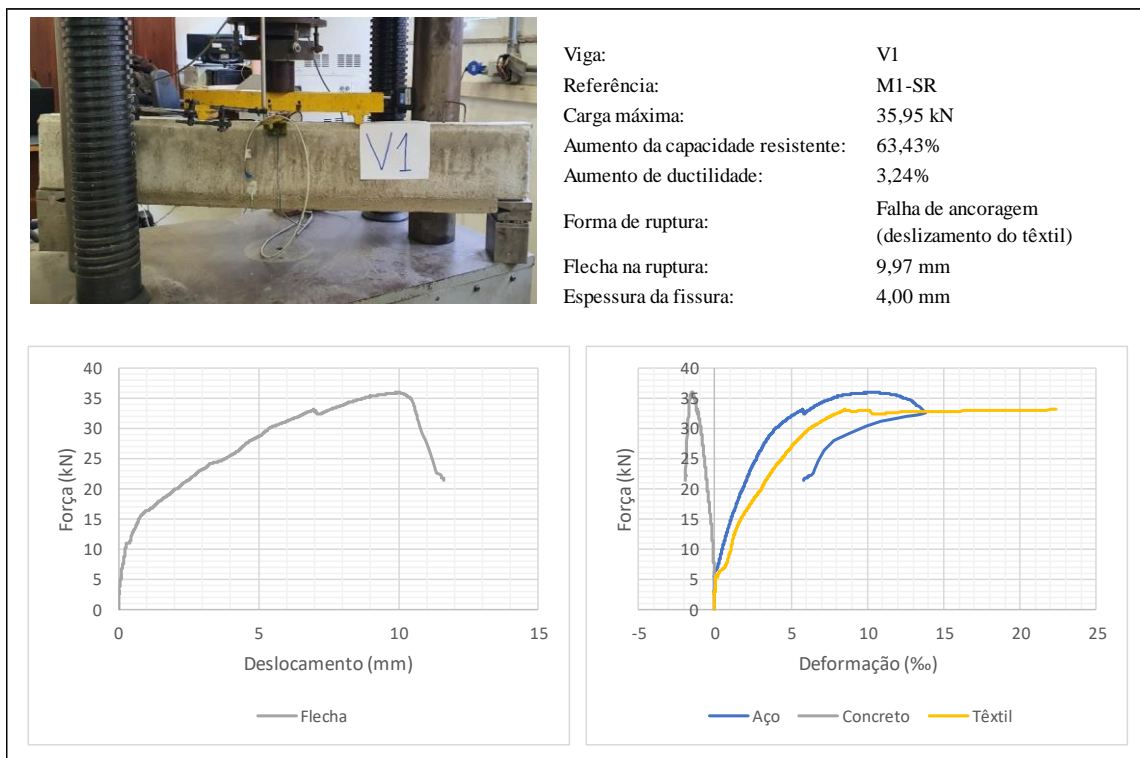
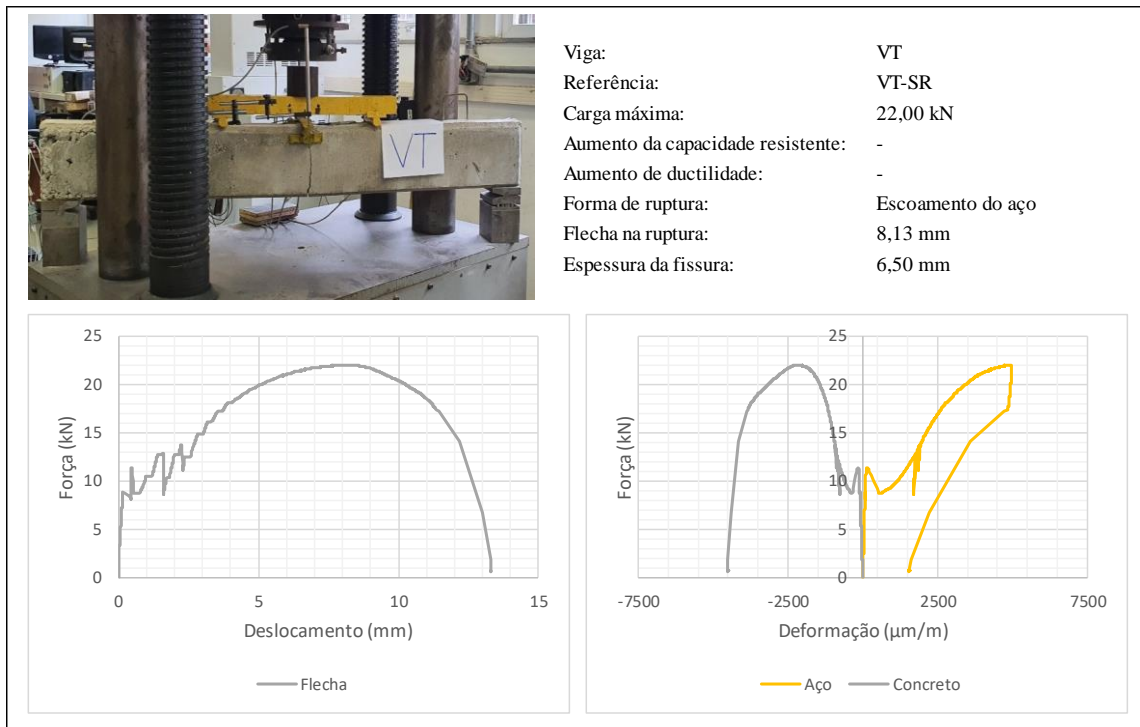
TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. **Concreto autoadensável.** Editora PINI, 1ª ed., São Paulo, 2008.

VALERI, P.; RUIZ, M. F.; MUTTONI, A. **Experimental research on textile reinforced concrete for the development of design tools.** 12th fib International PhD Symposium in Civil Engineering, Czech Technical University in Prague, Prague, 2018, p. 1-8.

WIGHT, J. K.; MACGREGOR, J. G. **Reinforced Concrete: Mechanics and Design.** Pearson, 6ª ed., 2012.

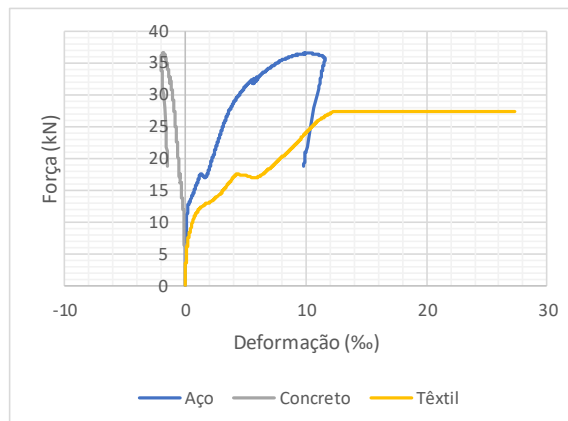
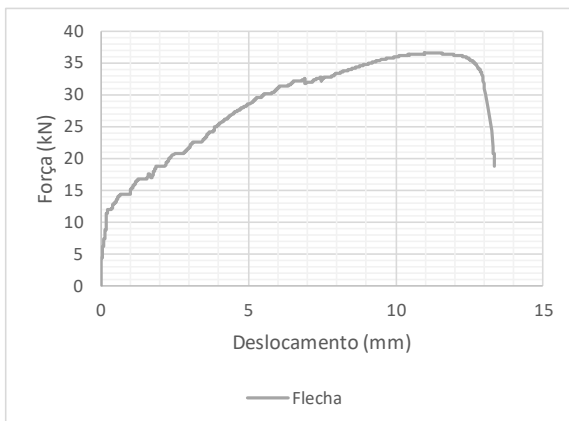
APÊNDICE A - Síntese de resultados dos ensaios de flexão

a) Lote 1

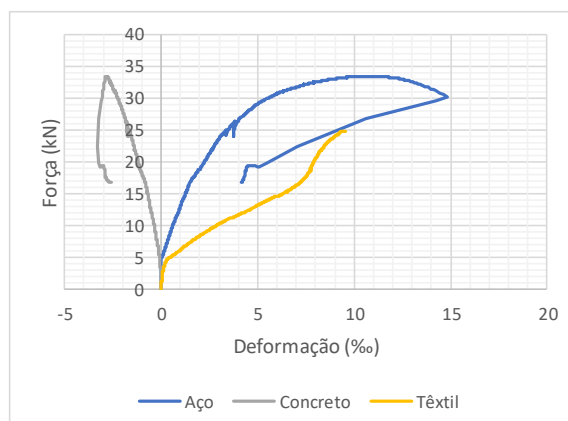
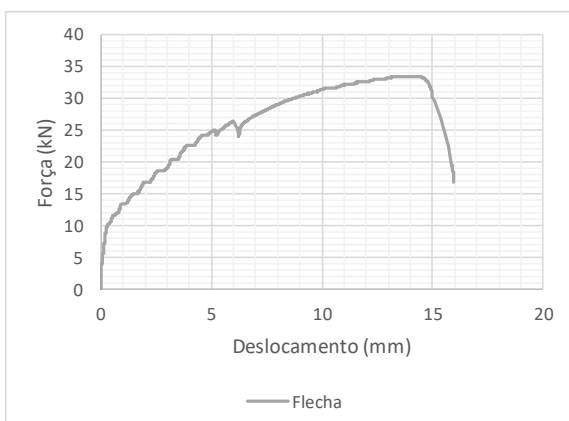




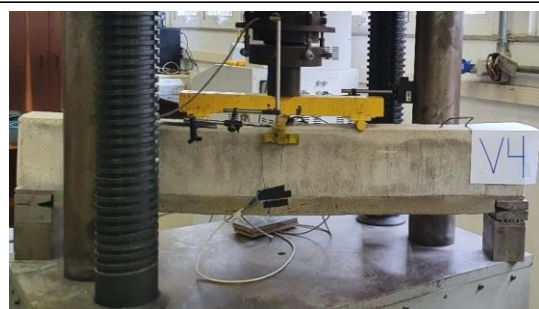
Viga:	V2
Referência:	M1-E-R1
Carga máxima:	36,53 kN
Aumento da capacidade resistente:	66,07%
Aumento de ductilidade:	13,01%
Forma de ruptura:	Falha de ancoragem (deslizamento do têxtil)
Flecha na ruptura:	11,29 mm
Espessura da fissura:	4,60 mm



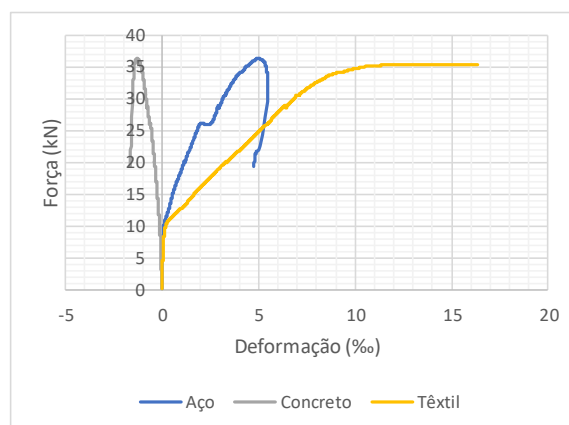
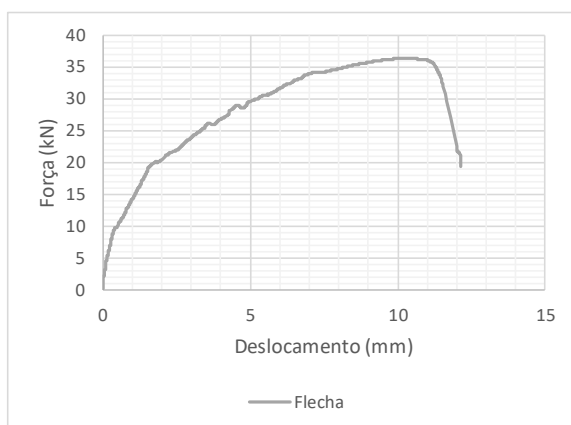
Viga:	V3
Referência:	M1-E-R2
Carga máxima:	33,44 kN
Aumento da capacidade resistente:	52,00%
Aumento de ductilidade:	36,09%
Forma de ruptura:	Falha de ancoragem (deslizamento do têxtil)
Flecha na ruptura:	13,83 mm
Espessura da fissura:	4,50 mm



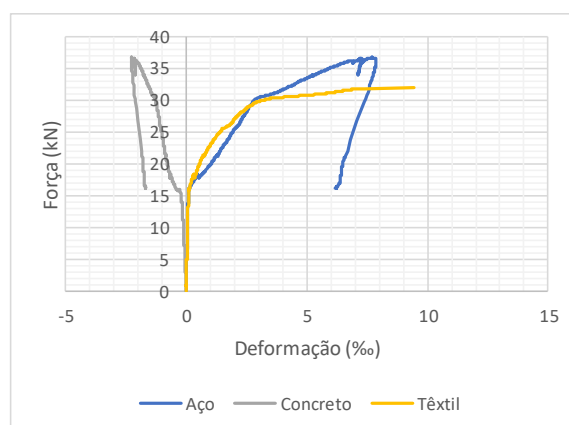
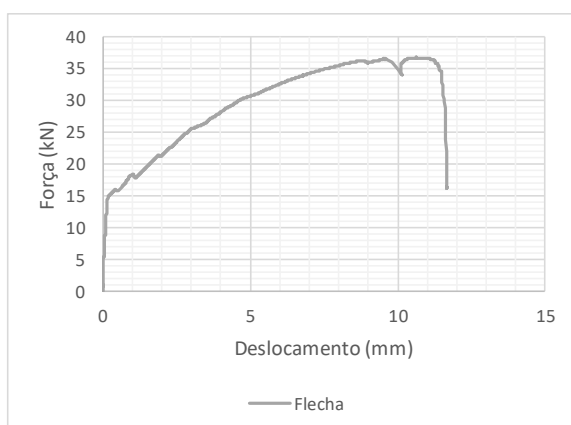
b) Lote 2



Viga:	V4
Referência:	M1-EA-R1
Carga máxima:	36,44 kN
Aumento da capacidade resistente:	65,67%
Aumento de ductilidade:	17,29%
Forma de ruptura:	Falha de ancoragem (deslizamento do têxtil)
Flecha na ruptura:	10,33 mm
Espessura da fissura:	4,00 mm

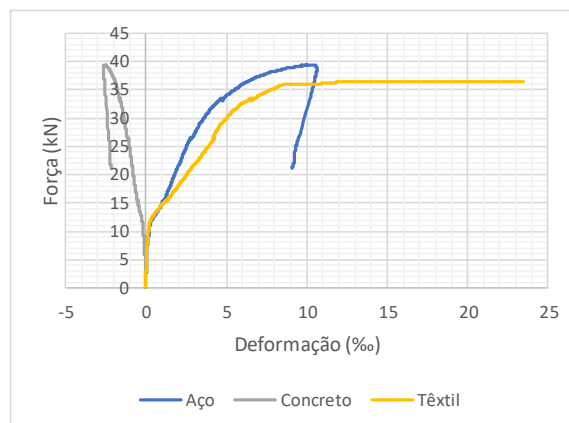
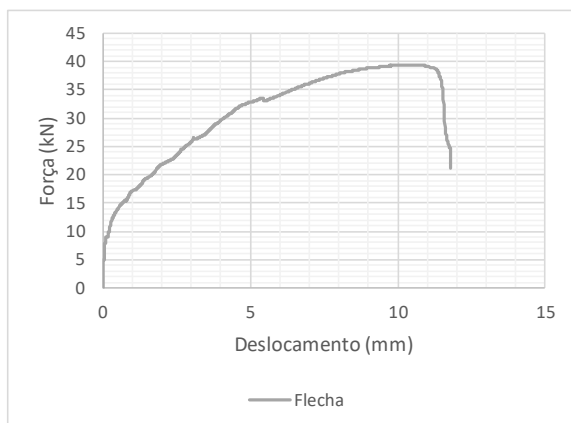


Viga:	V5
Referência:	M1-EA-R2
Carga máxima:	36,67 kN
Aumento da capacidade resistente:	66,70%
Aumento de ductilidade:	36,44%
Forma de ruptura:	Falha de ancoragem (deslizamento do têxtil)
Flecha na ruptura:	10,63 mm
Espessura da fissura:	4,20 mm

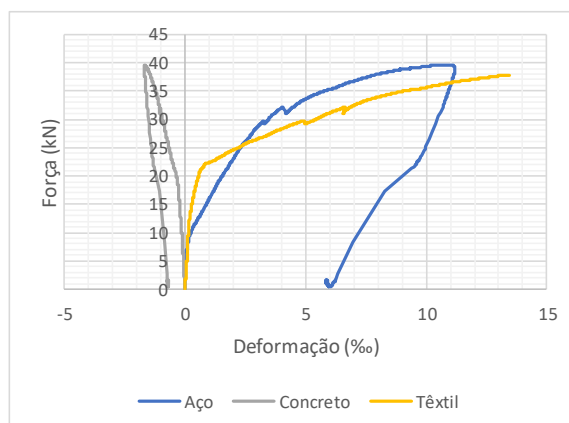
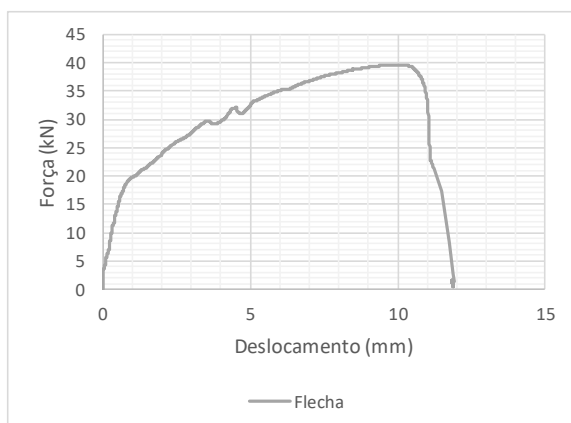




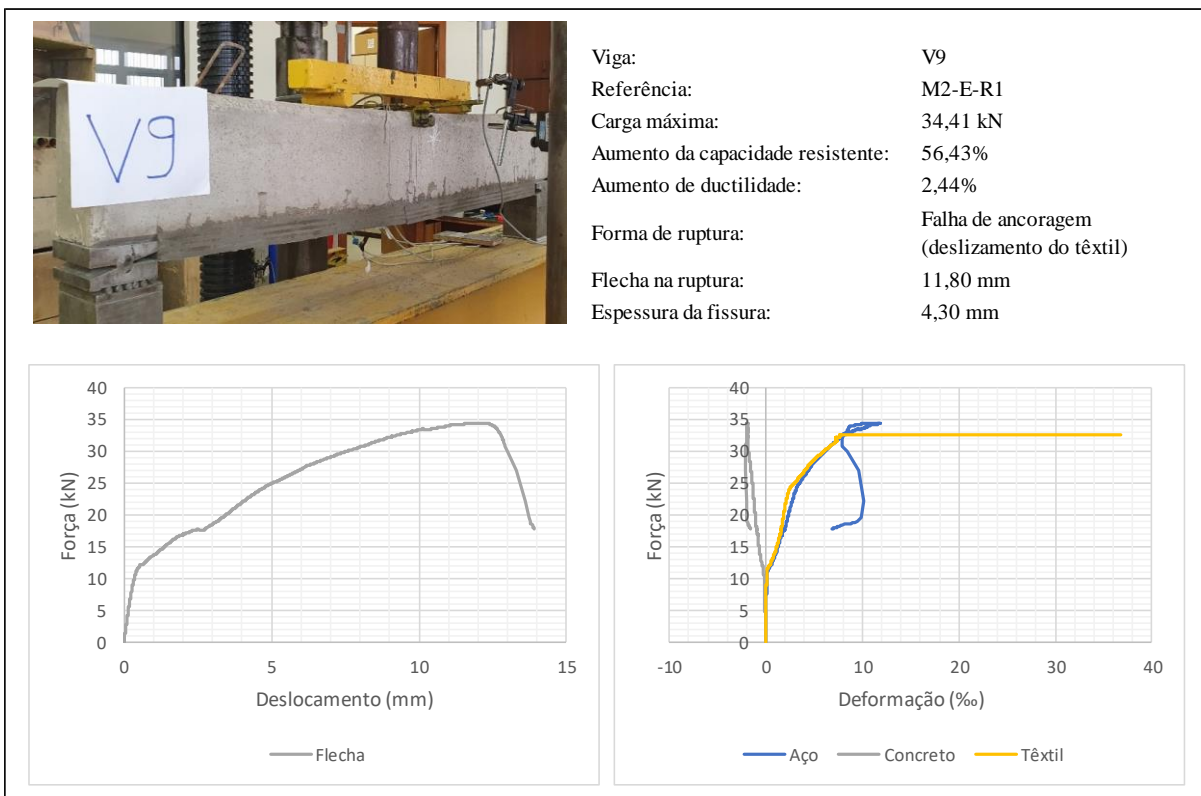
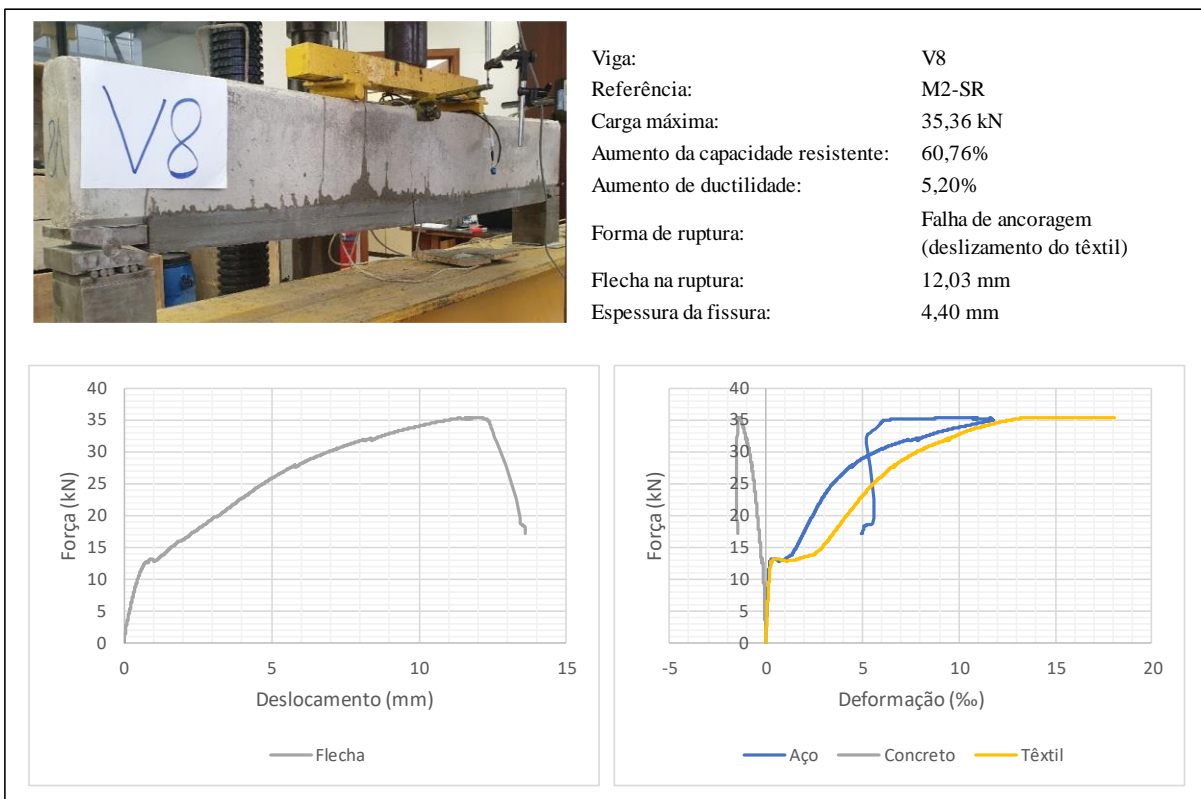
Viga:	V6
Referência:	M1-EAP-R1
Carga máxima:	39,45 kN
Aumento da capacidade resistente:	79,31%
Aumento de ductilidade:	37,08%
Forma de ruptura:	Falha de ancoragem (deslizamento do têxtil)
Flecha na ruptura:	10,57 mm
Espessura da fissura:	5,00 mm



Viga:	V7
Referência:	M1-EAP-R2
Carga máxima:	39,65 kN
Aumento da capacidade resistente:	80,26%
Aumento de ductilidade:	36,09%
Forma de ruptura:	Falha de ancoragem (deslizamento do têxtil)
Flecha na ruptura:	9,80 mm
Espessura da fissura:	6,50 mm

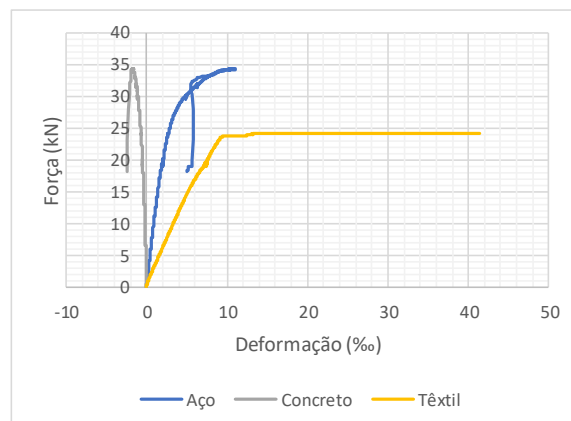
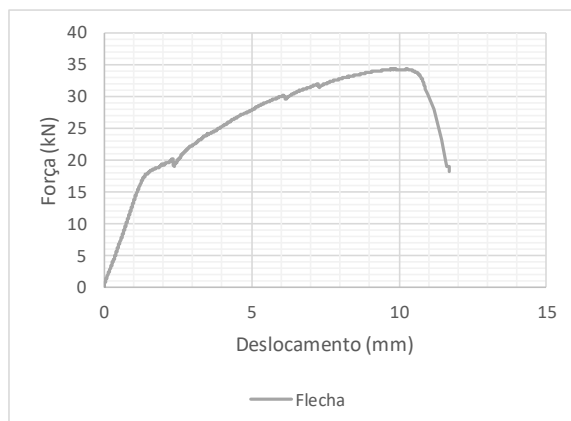


c) Lote 3

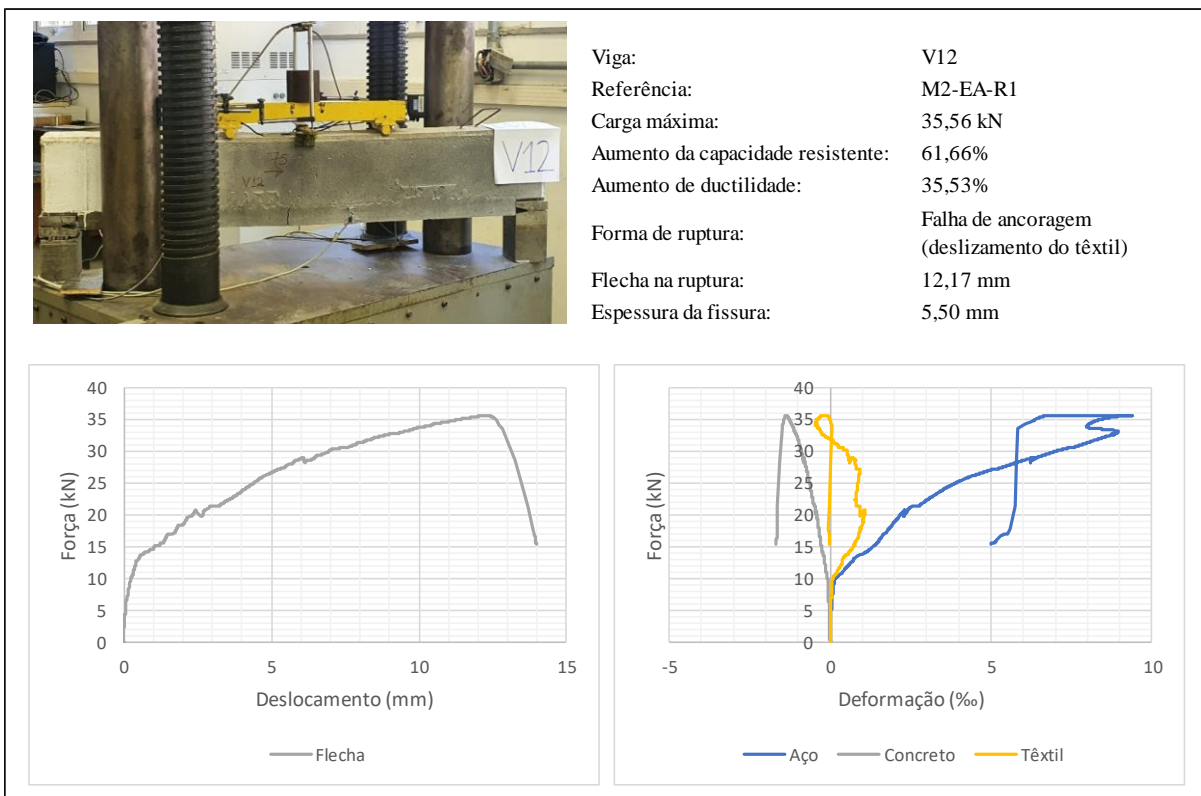
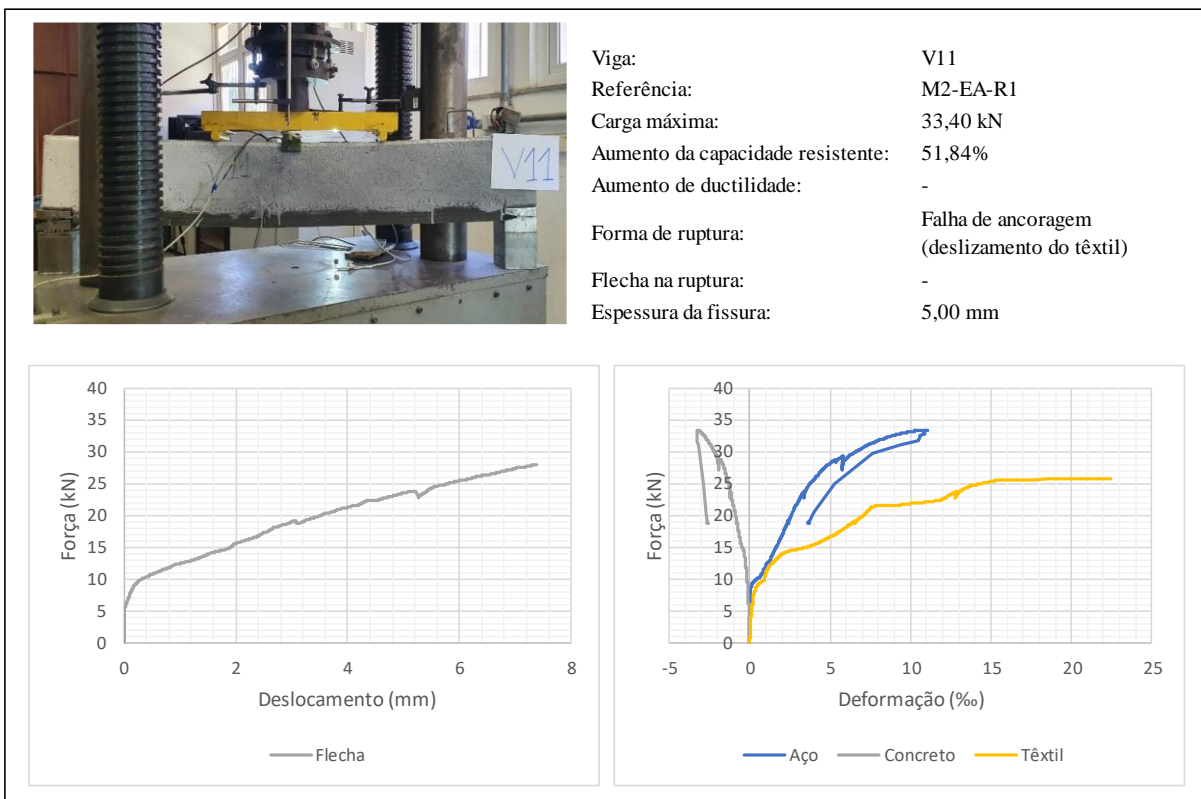




Viga:	V10
Referência:	M2-E-R2
Carga máxima:	34,32 kN
Aumento da capacidade resistente:	56,01%
Aumento de ductilidade:	3,87%
Forma de ruptura:	Falha de ancoragem (deslizamento do têxtil)
Flecha na ruptura:	9,85 mm
Espessura da fissura:	4,70 mm

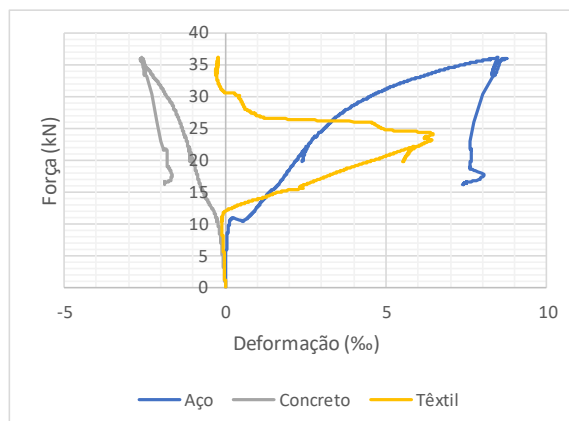
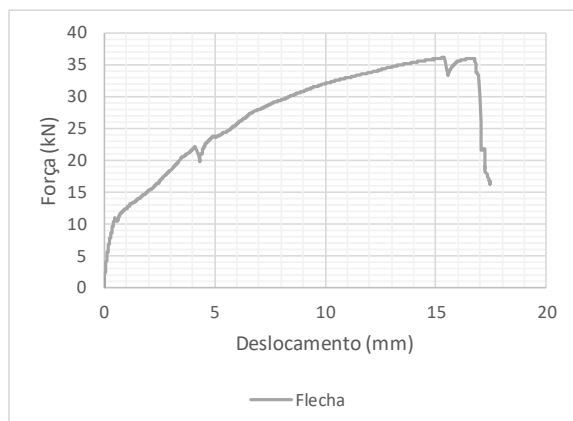


d) Lote 4

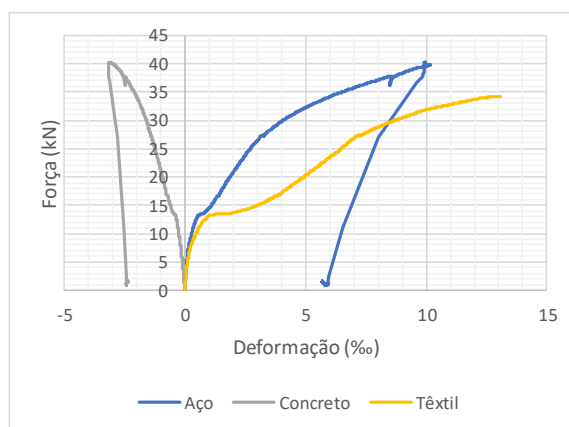
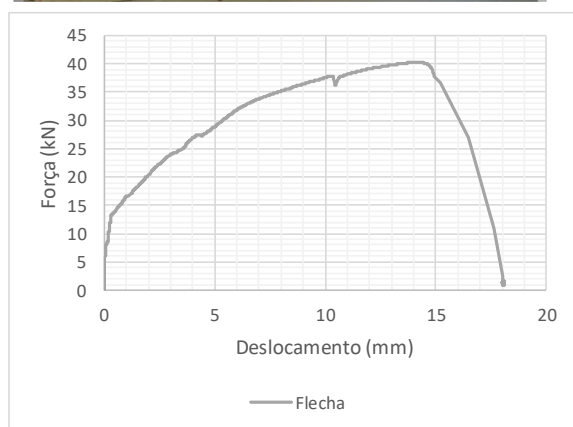




Viga:	V13
Referência:	M2-EAP-R1
Carga máxima:	36,10 kN
Aumento da capacidade resistente:	64,10%
Aumento de ductilidade:	36,95%
Forma de ruptura:	Ruptura na interface com a armadura longitudinal de tração
Flecha na ruptura:	15,31 mm
Espessura da fissura:	-



Viga:	V14
Referência:	M2-EAP-R2
Carga máxima:	40,31 kN
Aumento da capacidade resistente:	83,24%
Aumento de ductilidade:	33,79%
Forma de ruptura:	Ruptura do têxtil
Flecha na ruptura:	14,05 mm
Espessura da fissura:	9,00 mm



APÊNDICE B – Planilha de verificação (análise teórica)

VERIFICAÇÃO SEÇÃO RETANGULAR - VIGA DE CONCRETO ARMADO COM REFORÇO DE CONCRETO TÊXTIL																
DADOS DA SEÇÃO			CONCRETO			ARMADURA TRACIONADA (AS1)			ARMADURA COMPRIMIDA (AS2)			CONCRETO TÊXTIL				
bw	12,00	cm	Ec	29,39	GPa	fyk	738,48	MPa	fyk	738,48	MPa	Camadas têxtil e (têxtil)	3	cm		
h	20,00	cm	Ec	2939,00	kN/cm ²	fyd	642,16	MPa	fyd	642,16	MPa	Nº urdumes	8	-		
lef	140,00	cm	fck	32,55	MPa	ost	73,85	kN/cm ²	osc	73,85	kN/cm ²	Força unitária fio	0,66	kN		
c	2,00	cm	fck	3,26	kN/cm ²	Es	210,00	GPa	Es	210,00	GPa	Área unitária fio	0,0175	cm ²		
d	17,25	cm	fcd	23,25	MPa	Es	21000,00	kN/cm ²	Es	21000,00	kN/cm ²	σ	37,71	kN/cm ²		
d'	2,75	cm				n	2	-	n	2	-	Área de fios	0,42	cm ²		
h'	21,475	cm				Ø	0,50	cm	Ø	0,50	cm	Er	8000,00	kN/cm ²		
						As1	0,39	cm ²	As2	0,39	cm ²	Camadas arg. e (arg.)	4	-		
													0,60	cm		
PRIMEIRO CÁLCULO DA LINHA NEUTRA (x)																
Rcc	15,84	kN	ITERAÇÃO	1	0,50691	1	867,59	ÚLTIMO (kN.c)	37,18	est	0,01	10,00 %	DOMÍNIO 2			
Rst	29,00	kN		2	1,14772	2	846,52		36,28	ec	0	0,00 %		βk	0	
Rsc	29,00	kN		3	1,42265	2	834,14		35,75		0,0035	3,50 %			0,26	
Rrt	15,84	kN		4	1,53948	2	828,27		35,50	DOMÍNIO 3						
1ª LN (x):	0,51	cm		5	1,58890	2	825,67		35,39	est	0,01	10,00 %		βk	0,26	
Domínio	2	-		6	1,60977	2	824,56		35,34		0,003516571	eyd	0,50			8,60
				7	1,61857	2	824,08		35,32	ec	0,0035	3,50 %	DOMÍNIO 4			
				8	1,62228	2	823,88		35,31						βk	0,50
				9	1,62385	2	823,80		35,31	est	0,003516571	eyd	1,00			8,60
				10	1,62451	2	823,76		35,30	ec	0	0,00 %			17,25	
				11	1,62479	2	823,75		35,30		0,0035	3,50 %				

APÊNDICE C – Análise numérica e modelagem computacional

Com o propósito de validar o resultado da análise teórica, realizou-se a análise numérica e a modelagem computacional da viga testemunho no *software* ANSYS (*Analysis System Incorporated*) na versão *Student* 2022 R2. Para simular o comportamento da viga testemunho utilizou-se os elementos SOLID 65, LINK 180 e SOLID 185.

- a) SOLID 65: utilizado para a discretização do volume de concreto, é capaz de simular a fissuração na tração e o esmagamento na compressão, além de avaliar a não linearidade geométrica, e possibilitar a inclusão das armaduras de forma discreta ou distribuída. É composto por 8 nós e 3 graus de liberdade (ux , uy e uz) por nó.
- b) LINK 180: elemento uniaxial utilizado para a representação das barras longitudinais e dos estribos. Composto por 2 nós e 3 graus de liberdade por nó (ux , uy e uz), é capaz de considerar de forma discreta a armadura passiva e a aderência perfeita entre aço e concreto.
- c) SOLID 185: empregado para simular os pontos de apoios e de carga. Definiu-se para este elemento um alto valor de módulo de elasticidade, de modo a não se deformar sob a aplicação de carga. É composto por 8 nós e 3 graus de liberdade (ux , uy e uz) por nó.

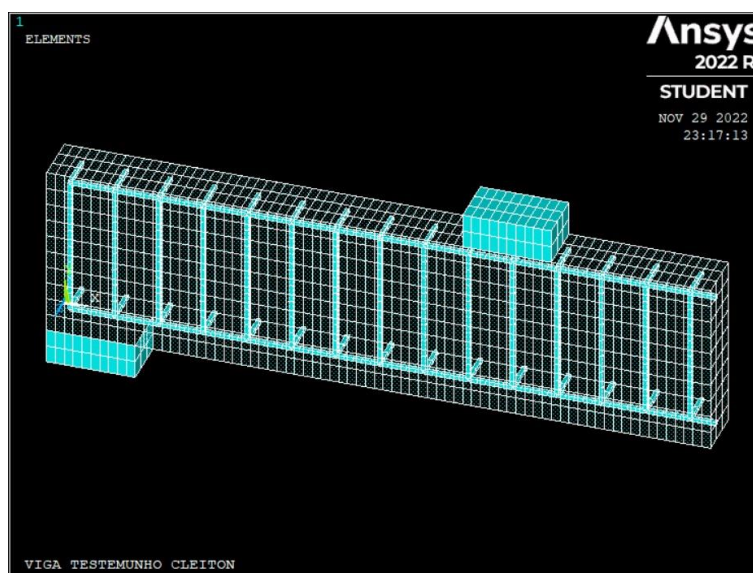
Na sequência, introduziram-se as propriedades e relações constitutivas dos materiais. Posteriormente, definiram-se a malha, as vinculações, a restrição dos graus de liberdade e a carga externa. Por conseguinte, associaram-se modelos constitutivos ao elemento SOLID 65, definindo-se os parâmetros que melhor simulam o comportamento elastoplástico do material:

- a) *Linear isotropic*: modelo constitutivo elástico, utilizado para definir o módulo de elasticidade tangente e o coeficiente de Poisson. Para a análise da viga testemunho, empregaram-se os mesmos os valores utilizados na análise teórica;
- b) *Multilinear elastic*: modelo constitutivo não linear utilizado para estabelecer o comportamento do concreto à compressão. A informação de entrada é a curva tensão deformação do material;
- c) *Concrete*: modelo constitutivo não linear, com superfície de plastificação definida por 5 parâmetros: resistência à tração uniaxial (f_t), resistência à compressão uniaxial (f_c), resistência à compressão biaxial (f_{cb}), tensão limite biaxial à compressão no estado de

tensões hidrostático ($f1$) e tensão limite uniaxial à compressão no estado de tensões hidrostático($f2$). Empregado para simular o comportamento do concreto à tração e à compressão.

Para a representação das armaduras, adotaram-se os parâmetros de comportamento *linear isotropic* e *bilinear*, no qual o coeficiente de Poisson é de 0,2. Devido à dupla simetria, pode-se modelar apenas $\frac{1}{4}$ da viga. Após a construção do modelo discretizado, tem-se início a fase de solução. Ao final, verifica-se a ruptura da viga testemunho para a carga de 21,8 kN.

a) Modelagem da viga testemunho



b) Curva da carga em função do deslocamento gerada pelo do *software* ANSYS

